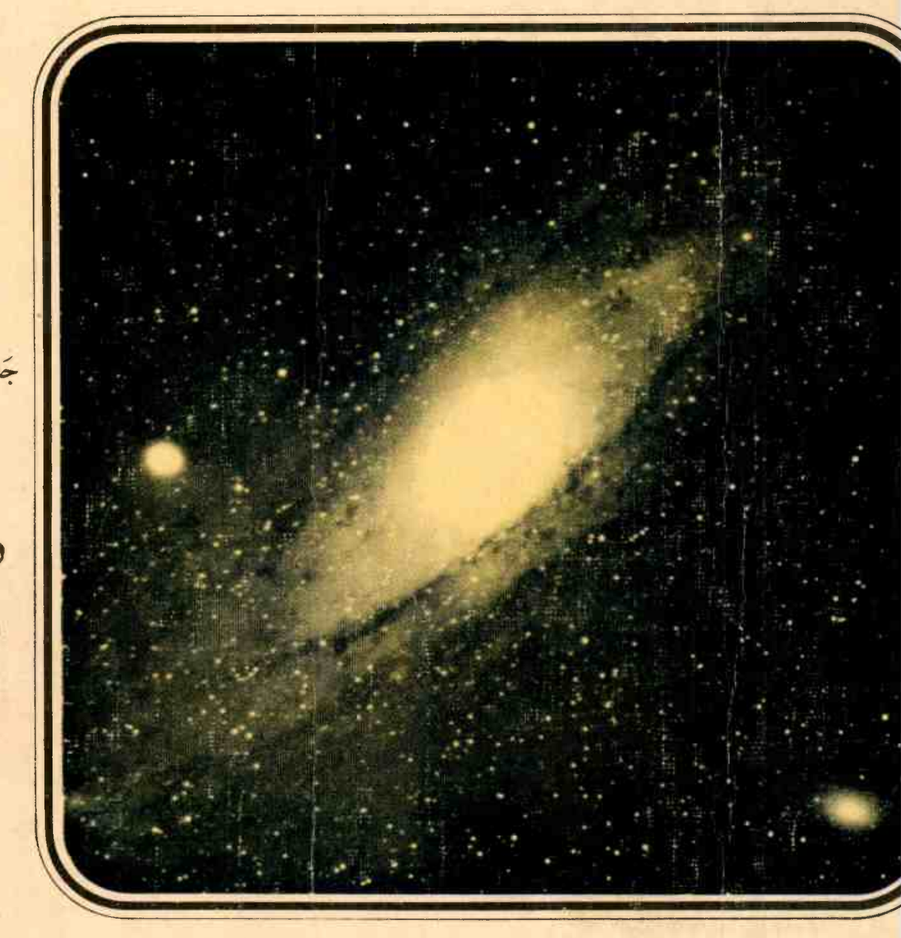
طبيعة قوانين الفيزياء

رُؤية واضحة وعصريّة لبُنية العالم



تأليف

رتشارد فاينمان

جائزة نوبل للفيزياء عام ١٩٦٥

ترجمة :

د. أدهم السمّان

أستاذ الفيزياء في جامعة دمشق

مؤسسة الرسالة

طبيعة قوانين الفيزياء

رؤية واضحة وعصرية لبنية العالم





الشركة المتحدة للتوزيع

سوريا - دمشق - شارع مسلّم البارودي - بناء خولي وصلاحي رقم ٣٧

هاتف ٢١٢٧٧٣ - ص. ب ١١٧٢١ - برقياً : بيوشران - تلكس ٤١١٥٢٩ دعبول

رتشارد فاينمان

طبيعة قوانين الفيزياء

رؤية واضحة وعصرية لبنية العالم

ترجمة:

د. أدهم السمان

هذا الكتاب ترجمة أخرى عنوانها السمات لقانون الفيزيائي أبو الوفا أبو العارف سالم وخليل علي الربيعة صدرت سنة 2015 عن الجمعية العلمية السعودية للعلوم الفيزيائية

العنوان الاصلي للكتاب

The Character of Physical Law

Richard Feynman

ان الفصول السبعة التي يتالف منها هذا الكتــاب هي سلسلة محاضرات ارتجلها العالم فاينمان بلهجة اليفة واسلوب يتسم بالفكاهة . ولايستطيع سوى احد كبــار الفيزيائيين في عصرنا الحاضر أن يشرح بمثل هذه الكفاءة وهذا الوضوح مواضيع الفيزياء التقليدية ومواضيع الفيزياء المعاصرة ، هذه الفيزياء التي أسهم فاينمان نفسه في تقدمها وجلاء غوامضها اسهاما خلاقا . وهذه المحاضرات تستهدف جمهورا واسعا من القراء ليس لديه بالضرورة المام عميق بالرياضيات فترسم له صورة تحليلية واضحة وعصريةللقوانين الاساسية في الفيزياء وتروي له تاريخ هذا العلم منذ عصر غاليله حتى أيامنا هذه .





مقدمة

ان الفصول السبعة التي يتألف منها هذا الكتاب هي نصوص سلسلة من المحاضرات ألقيت في جامعة كورنيل في الولايات المتحدة الامريكية تحت اسم «محاضرات ميسنجر» ، أمام جمهور من السامعين يتألف من طلاب يريدون أن يغنوا معارفهم العامة عن « طبيعة القانون الفيزيائي ». وقد كانت هذه المحاضرات ارتجالا تنظمه بضعة رؤوس أقلام دون نصوص مكتوبة مسبقا .

ان « محاضرات ميسنجر » كانت تلقى في كورنيل كل عام منذ أن تبرع ج.ج. ميسنجر (الذي كان طالبا ثم أستاذا للرياضيات في الجامعة) عام ١٩٢٤ بمبلغ من المال لتغطية نفقات مشاهير الاعلام الذين يفدون من جميع أنحاء العالم ليتحدثوا الى الطلاب . ولدى تقرير هذه المحاضرات أراد ميسنجر منها أن « تكون دروسا في تطور الحضارة تستهدف بالتدقيق السمو بالموازين الاخلاقية لحياتنا السياسة والاقتصادية والاجتماعية »

وفي تشرين الثاني (نوفمبر) ١٩٦٤ دعي الاستاذ رتشارد ب. فاينمان الفيزيائي والمعلم الشهير ، لالقاء محاضرات ذلك العام . كان فاينمان أستاذا في كورنيل وهو الآن أستاذ الفيزياء النظرية في مؤسسة كاليفورنيا للتكنولوجيا . وقد عين مؤخرا عضوا أجنبيا في الجمعية الملكية الانكليزية، وقد أشتهر ليس فقط في الاسهام في معلوماتنا الحالية عن قوانين الفيزياء بل وأيضا بموهبته الفذة في التبسيط .

وفصول هذا الكتاب هي تلك المحاضرات التي ألقاها الاستاذ فاينمان على جمهور حاشد ، من منبر واسع يؤمن له الحرية الكاملة في التعبير

والحركة لانه ، كمحاضر ذي سمعة دولية ، قد اشتهر بحركاته المعروفة على ساحة المنبر .

ان هذا الكتاب يريد أن يكون دليلا أو كتاب تذكرة لمشاهدي التلفزيون الذين يرغبون ، بعد أن حضروا المحاضرات ، في أن يحتفظوا لها بذكرى راسخة .

وبالرغم من أنه لايجب أن يعتبر ، بحال من الاحوال ، كتابا مدرسيا فان كثيرا من المحاكمات الواردة فيه يمكن أن تنير الطريق للطالب الذي يحاول أن يتفهم قوانين الفيزياء بصورة أوضح .

هذا وان رتشارد فاينمان يعرفه ، قبل الآن ، مشاهدو التلفزيون البريطاني كأحد الفيزيائيين الذين قدمهم فيليب دالي في برنامجه المسمى « رجال في قلب الطبيعة » وفي اسهامه الرائع في « غرابة ناقص ثلاثة » أحد أمتع برامج ١٩٦٤ حول الاكتشافات العلمية الحديثة .

لقد أثار خبر تكليف الاستاذ فاينمان ب « محاضرات ميسنجر » اهتماما كبيرا في قسم العلوم والمواضيع الخاصة في الاذاعة البريطانية . وقد ادرجت هذه السلسلة في برامج البث رقم ٢ في اطار « برنامج التثقيف المستمر » على شاكلة المحاضرات التي كان قد القاها رجال اعلام مثل بندي في النسبية وكندرو في البيولوجيا الجزيئية وموريسون في ميكانيك الكم وبورتر في الترموديناميك .

ان ماستقرأونه هو نسخة مكتوبة لهذه المحاضرات ، وقد دقق فاينمان في صحتها العلمية . وقد قمت شخصيا مع مساعدتي فيونا هلميس بتجميع الكلمات الملفوظة وبتقديمها لكم مطبوعة . ونأمل أن يحوز هذا الكتاب رضاكم . فالعمل مع رتشارد فاينمان كان تجربة غنية ، ونحن على يقين من أن القراء سيحصلون على فائدة كبيرة من هذا الانجاز .

الان سميث
منتج في الاذاعة البريطانية ، البرامج الخارجية
قسم العلوم والمواضيع الخاصة .
حزيران (يونيو) ١٩٦٥

ناظر جامعة كورنيل
ديل ر. كرسن

يقدم محاضر « ميسنجر » لعام ١٩٦٤

سيداتي وسادتي : لي الشرف بأن أقدم لكم محاضر « ميسنجر » الاستاذ رتشارد ب. فاينمان من مؤسسة كاليفورنيا للتكنولوجيا .

ان الاستاذ فاينمان فيزيائي كبير ، وهو نظري عمل كثيرا في سبيل توضيح التطورات المدهشة ، والغامضة غالبا ، التي عرفتها الفيزياء بعد الحرب . ولن أذكر من بين الامجاد والامتيازات التي حازها سوى جائزة البرت أينشتاين التي منحت له عام ١٩٥٤ . وتتألف هذه الجائزة ، التي تمنح كل ثلاثة أعوام ، من ميدالية ذهبية ومبلغ محترم من المال .

بدأ الاستاذ فاينمان دراسته الجامعية في مؤسسة ماساشوستس للتكنولوجيا واتمها في برينستون ، وعمل في اطار مشروع منهاتن في برينستون ثم في لوس آلاموس ، وعيّن استاذا مساعدا في كورنيل عام ١٩٤٤ ولكنه لم يستوطنها قبل نهاية الحرب . ولقد خطر لي انه قد يكون من المثير أن نرى ما كان قد قيل عنه حين تعيينه . ولهذا رحت أنقب في السجلات القديمة لمجلس ادارتنا ... دون أن أعثر على أي أثر لهذا التعيين . ولكني وجدت رغم ذلك قرابة عشرين وثيقة حول عطلاته وزيادات راتبه وترفيعاته . وقد أثارت احداها اهتمامي بصورة خاصة . ففي ٣١ تموز (يوليو) ١٩٤٥ كتب مدير قسم الفيزياء الى عميد الكلية ان « الدكتور فاينمان هو معلم وباحث من الدرجة الاولى ومن مستوى

يندر امثاله » . ويرى المدير أن راتب ثلاثة آلاف دولار في السنة قليل لعلم جامعي ، ويقترح للاستاذ فاينمان زيادة تسعمائة دولار في السنة . وقد شطب العميد ، بنخوة كرم نادرة ، على العدد تسعمائة ودون أن يعير الامكانات المالية للجامعة اي اهتمام كتب ألفا مدورة بدلا منه . وهكذا ترون اننا كنا منذ ذلك الوقت نكنّ للاستاذ فاينمان فائق التقدير . واستقر فاينمان هنا في أواخر عام ١٩٤٥ وقضى خمس سنوات في انتاج غزير . وغادر كورنيـل عام ١٩٥٠ الى كالتك (مؤسسـة كاليفورنيا للتكنولوجيا) وبقي منذئذ هناك .

وقبل ان أترك له الكلام أود أن أضيف بضع كلمات . فمنذ ثلاث سنوات بدأ باعطاء دروس فيزياء للسنة الاولى كانت نتائجها انه أضاف اتساعا جديدا لشهرته . فلقد نشرت دروسه في ثلاثة مجلدات تمنح الافكار التقليدية شبابا جديدا .

لقد وُضعت في مقدمة هذه الدروس صورة لفاينمان وهو يعزف بمرح على طبلة « البنجو » . ويقول لي أصدقائي في كالتك انه يحدث له أن ينزل الى علب الليل في لوس انجليس ويأخذ مكان عازف الطبول في الجوقة ؛ ولكن الاستاذ فاينمان يؤكد لي أن هذا ليس صحيحا . وفتح الاقفال ذات السر هو ايضا أحد اختصاصاته . وهناك أسطورة تقول انه كان ذات يوم في مؤسسة سرية ، ففتح فيها خزنة موصدة واخرج منها وثيقة سرية وترك مكانها بطاقة كتب عليها : « احزروا من ؟ » . يمكن أيضا أن أروي ، حين كان عليه أن يذهب لالقاء سلسلة من المحاضرات في البرازيل ، كيف تعلم اللغة الاسبانية قبل أن يذهب الى هناك . ولكني لن أفعـل .

أظن انكم الآن قد عرفتم عنه ما يكفي . فدعوني أقل لكم إذن انني مسرور جدا باستقبال الاستاذ فاينمان من جديد في كورنيل . وموضوع محاضراته هذا العام هو « القانون الفيزيائي وطبيعته » وسيحدثنا هذا المساء عن « قانون التثاقل كمثال على القانون الفيزيائي » .

د. ر. كرسن

١

قانون التثاقل

مثال على القانون الفيزيائي

من الطريف ، في المناسبات النادرة التي يطلب مني فيها أن أعزف على « البنجو » أمام الجمهور ، أن الذي يقدمني لا يرى ، على ما يبدو ، أية ضرورة لان يذكر انني أمارس الفيزياء النظرية أيضا . والارجح ، على ما أظن ، أن هذا ناتج عن أننا نحترم الفنون أكثر من العلوم . فالفنانون في عصر النهضة كانوا يقولون بأن الانسان يجب أن يكون موضوع الاهتمام الاول للانسان . ولكن يوجد مع ذلك في هذا العالم أشياء أخرى تستحق الاهتمام . والفنانون انفسهم يستهويهم منظر الشمس الغاربة وأمواج المحيط وسير النجوم في رحاب سماء . فهناك اذن أسباب قوية لان نهتم بها أيضا . وهذا التأمل لوحده كاف لان يولد لدينا ارتياحا من النوع الجمالي . لكن يوجد أيضا في هذه الظواهر الطبيعية ايقاع وبنية خافيان على العين ولايبرزان الا عند التمحيص . ان هذه الايقاعات وتلك البنى هي التي نسميها القوانين الفيزيائية . وانا أريد أن اناقش ، في سلسلة المحاضرات هذه ، الخواص العامة لهذهالقوانين الفيزيائية وذلك فيمستوى اكثر عمومية ، اذا سمحتم ، من دراسة القوانين ذاتها . والواقع أن الموضوع هو الطبيعة كلها كما تبرز من خلال تحليل مفصل . ولكننيأريد أساسيا أن اتحدث عن مظاهرها الاكثر عمومية .

ان هذا الموضوع بعموميته يتطور في هذه الايام ليصبح فلسفيا اكثر من اللازم : اذ يكفي أن تقول اشياء عامة يفهمها كل الناس حتى يقال

عنك أنك فيلسوف عميق . على أنني اريد ان احدّ الموضوع بشكل واضح واحب ان أكون مفهوما بدقة أكبر وليس فقط بشكل غامض . وعلى هذا الاساس سأحاول ، في هذه المحاضرة ، ان أعطي ، بدلا عن مجرد العموميات ، مثالا قانونا فيزيائيا يتيح لكم على الاقل أن تروا فيه مثالا على الاشياء التي سأتكلم عنها بصورة عامة . فهكذا أستطيع أن أستخدم هذا المثال في كل مرة أشعر فيها بالحاجة الى التوضيح ، أو لكي أجعل ملموسا كل مايبدو ، بدون هذا المثال ، تجريديا أكثر من اللازم . وكمثال خاص على القانون الفيزيائي اخترت ظاهرة التثاقل . ولماذا اخترت هذا المثال ؟ لا ادري ذلك بالضبط . ربما لانه كان أحد أوائل القوانين الكبرى التي اكتشفت ؛ وله قصة تثير الاهتمام . وقد تقولون في أنفسكم : «نعم، ولكن هذه حجة عتيقة . ونحن نحب أن نسمع كلاما عن علم أكثر عصرية .» ربما كان هناك علم أكثر حداثة ولكن ليس أكثر عصرية . فالعلم العصري يقع تماما في سياق اكتشاف قانون التثاقل . وربما لا يكون الحديث عن المكتشفات الاكثر حداثة اكثر من كلام . وانا لا أشعر في ضميري بأي تبكيت حين أتحدث لكم عن قانون التثاقل لانني عندما اسرد تاريخه وطرائقه وكنهه وملابسات اكتشافه أشعر أنني عصري تماما .

لقد قيل ان هذا القانون كان « أكبر تعميم انجزه الفكر البشري » ، ولكنكم تحزرون منذ الآن ، من مقدمتي هذه ، أنني لا أهتم بالفكر البشري بقدر ما أهتم بعجائب طبيعة يمكن أن تطيع قانونا بمثل البساطة والاناقة اللتين يتمتع بهما قانون التثاقل . وعلى هذا الاساس فنحن معجبون خصوصا ، لا بالبراعة التي ظهرت باكتشاف هذا القانون ، بل بالبراعة التي تظهرها الطبيعة في اتباع أحكامه .

ان قانون التثاقل يؤكد أن اي جسم يؤثر في أي جسم آخر ويتأثر منه بقوة تتناسب عكسيا مع مربع المسافة التي تفصل بينهما وطرديا مع جداء (حاصل ضرب) كتلتيهما . ان هذا ما يمكن أن نعبر عنه بالصيغة :

$$ق = ث \frac{ك \times كَ}{م^{2}}$$

التي تحوي في طرفها الايمن رمزا للقوة ، وفي طرفهـا الايسر ثابتـا عدديا (ث) مضروبا بجداء كتلتي الجسمين (ك) و (كَ) ومقسوما على مربع المسافة (م) بين الجسمين . فاذا أضفت الآن أن كل جسم يتفاعل مع القوة بتسارع في حركته ، أي يغير سرعته بكمية متناسبة عكسيا مع كتلته فيعدّل سرعته بكميات أكبر كلما كانت كتلته أصغر ، أكون قـد قلت كل ما يستحق أن يقال عن قانون التثاقل . وكل ما يبقى هو نتيجة رياضية لهذين الشيئين . على انني أعلم انكم لستم جميعكم رياضيين وانكم لاتدركون لاول وهلة جميع ما يترتب على هاتين الملاحظتين . ولهذا أود ان أحكي لكم هنا بايجاز قصة هذا الاكتشاف ، وبعض نتائجه ، وكيف كان تأثيره على تاريخ العلوم ، والاسرار الكامنة في هذا القانون ، وشيئا ما عن التحسينات التي أدخلها آينشتاين . وربما أيضا عنعلاقته بقوانين الفيزياء الاخرى .

واليكم ، ببضع كلمات ، هذه القصة . لقد رصد القدماء اولا حركة الكواكب في السماء وخلصوا الى انها كلها ، بما فيها الارض ، تدور حول الشمس . وقد حدث هذا الاكتشاف مرة ثانية في وقت متأخر وبصورة مستقلة عند كوبرنيك بعد أن كان الناس قد نسوه . وعندئذ برز السؤال التالي : ما هي الكيفية الدقيقة التيتدور بموجبها الكواكبحول الشمس، أي ما هو بالضبط نوع هذه الحركة ؟ هل ترسم الكواكب في مسيرها دوائر مركزها الشمس أم أنها ترسم منحنيات من شكل آخر ؟ وبأيـة سرعة تتحرك ؟ الى آخر ما هنالك . وقد استغرق اكتشافالجواب على هذه الاسئلة وقتا أطول . فبعد كوبرنيك قامت مناقشات كبيرة لمعرفـة فيما اذا كانت الكواكب تدور مع الارض حول الشمس ، أم أن الارض تحتل مركز العالم ... الخ . ثم جاء رجل اسمه تيخو براهيه[1] تخيل طريقة للجواب على هذا السؤال . فقد فكر بأنه ربما كان من الخير ان يتم الرصد بعناية فائقة جـدا وان تسجل بالضبـط أمكنة الكواكب في السماء ، وعندئذ يمكن ان تقال كلمة الفصل بين النظريتين المتصارعتين. ذلك هو مفتاح العلم المعاصر وكان نقطة البدء لفهم الطبيعة بصورةحقيقية.

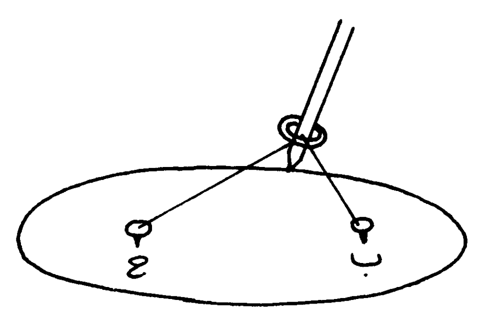
---

(١) تيخو براهيه ، ١٥٤٦ - ١٦٠١ ، فلكي دانمركي .

انها فكرة تفحص الشيء وتسجيل تفاصيله املا في ان هذه المعلومات المستقاة بهذه الطريقة تقود الى التفسير النظري . وعلى هذا الاساس فان تيخو ، وهو رجل غني كان يملك جزيرة بالقرب من كوبنهاغن ، قد جهز جزيرته بدوائر كبيرة من النحاس وبمحطات رصد خاصة ، وأخذ يسجل مواقع الكواكب ليلة بعدليلة . لابد من عمل شاق كهذا العمل ليتولد في نفوسنا الامل باكتشاف شيء عظيم .

وبعد أن تجمعت هذه المعلومات وصلت الى يدي كبلر الذي حاول عندئذ تحليل نوع الحركة التي تقوم بها الكواكب حول الشمس . واتبع في ذلك طريقة المحاولات المتتابعة . وقد خيل اليه في بادىء الامر انه وجد ما يريد : فتوهم انها ترسم دوائر حول الشمس ولكن مركز الشمس يتغير . ثم لاحظ كبلر ان أحد الكواكب محروف بمقدار ثمان دقائق قوسية واعتقد انه لايعقل أن يكون تيخو قد ارتكب خطأ جسيما كهذا وان ما اكتشفه بنفسه ليس هو الجواب الصحيح . وهكذا وبسبب دقة التجارب تمكن كبلر من اعادة المحاولة وتوصل في نهاية الامر الى اشياء ثلاثة .

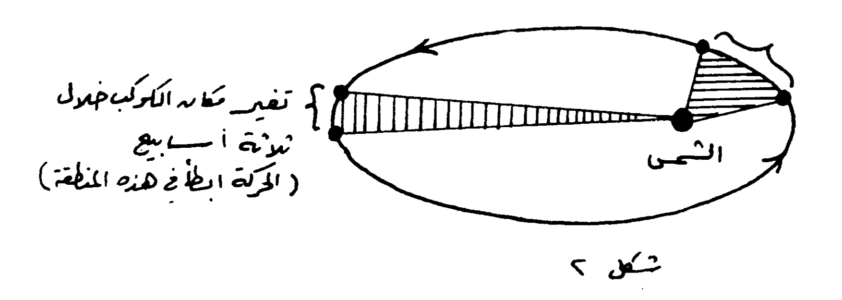
اكتشف اولا ان الكواكب ترسم حول الشمس منحنيات اهليلجية تحتل الشمس فيها أحد المحرقين . والاهليلج (أي ما يسميه الرياضيون القطع الناقص) هو منحن مغلق يعرفه جميع الناس لانه دائرة مفلطحة ، ويعرفه ايضا اولاد المدارس الذين يحكى لهم انهم اذا أدخلوا خيطا ضمن حلقة ثم ثبتوا طرفي الخيط كلا لوحده في نقطة من ورقة بيضاء ثم اولجوا راس قلم ضمن الحلقة وداروا به على الورقة والخيط مطنب ، حصلوا على الاهليلج ، كما هو موضح في الشكل ١ .



شكل ١

النقطتان : **ب** و **ج** هما المحرقان . وكل كوكب يرسم حول الشمس اهليلجا تحتل الشمس احد محرقيه . يمكن الان ان نتساءل كيف يقوم الكوكب بهذا الدوران على الاهليلج ؟ هل يسرع في حركته عندما يكون أقرب الى الشمس ؟ وهل يبطىء في حركته عندما يبتعد عنها ؟ لقد وجد كبلر ايضا الجواب على هذا السؤال .

تغير مكانه الكوكب خلال
ثلاثة أسابيع .
(الحركة اسرع في هذه
المنطقة) .



شكل ٢

لقد وجد انكم اذا سجلتم مكانين للكوكب في لحظتين مختلفتين تفصل بينهما فترة زمنية معينة ، ولنقل ثلاثة اسابيع ، ثم سجلتم في منطقة اخرى من المدار مكانين اخرين تفصل بينهما ايضا فترة ثلاثة اسابيع ورسمتم بعدئذ خطوطا مستقيمة (تسمى علميا انصاف اقطار شعاعية) تذهب من الشمس الى الكوكب ، فانكم ستجدون ان المساحة المحصورة ضمن مدار الكوكب والمستقيمين المفصولين بفترة الاسابيع الثلاثة تبقى على قيمتها في اية منطقة من المدار (اي ان المساحتين المخططتين في الشكل ٢ مثلا متساويتان) . وعلى هذا الاساس فان الكوكب لابد وان يسرع في حركته عندما يكون اقرب الى الشمس ويتباطأ كلما ابتعد عنها ، وذلك لكي يمسح المستقيم الذي يصله بالشمس مساحات متساوية خلال فترات زمنية متساوية (شكل ٢) .

وبعد عدة سنوات اكتشف كبلر قاعدة ثالثة تسيطر لا على حركة كوكب واحد فحسب بل تربط جميع الكواكب فيما بينها . وبموجب هذه القاعدة فان الزمن الذي يستغرقه الكوكب ليقوم بدورة كاملة واحدة حول الشمس مرتبط بتطاول المدار ، وان هذا الزمن يتغير من كوكب لاخر كما يتغير الجذر التربيعي لمكعب تطاول المدار . وتطاول المدار هو القطر الكبير المار بمحرقي الاهليلج .

اذن فقد اكتشف كبلر هذه القوانين الثلاثة التي يمكن ان نوجزها بقولنا **ان الكواكب تسير في افلاك اهليلجية وان مساحات متساوية تنمسح خلال أزمنة متساوية وان زمن الدورة الكاملة يتغير كما يتغير تطاول المدار مرفوعا الى أس يساوي ثلاثة انصاف** أي الجذر التربيعي لمكعب التطاول . فقوانين كبلر الثلاثة هذه تصف تماما حركة الكواكب حول الشمس .

اما السؤال الذي يلي ذلك فقد كان : ما الذي يجعل الكواكب تدور حول الشمس ؟ كان في عصر كبلر اناس يجيبون بأن وراء كل كوكب ملاك يخفق بجناحيه ويدفع الكوكب في مساره . وهذا الجواب، كما سترون ، ليس بعيدا جداعن الحقيقة . والفرق الوحيد أن للملائكة اماكن أخرى وأنها تخفق بجناحيها نحو داخل خط المدار .

كان غاليلة يدرس في ذلك العصر قوانين حركة الاجسام المألوفة الموجودة على سطح الارض . ولدى دراسة هذه القوانين ، من خلال عدد كبير من التجارب فحص فيهاكيف تتدحرج الكريات على مستو مائل وكيف يتأرجح النواس وحركات اخرى ، اكتشف غاليله مبدأ عظيما هو مبدأ العطالة وينص على مايلي :

اذا لم يؤثر شيء في جسم يتحرك في خط مستقيم بسرعة ما ، فان الجسم يستمر في حركته بالسرعة نفسها وعلى المستقيم نفسه . ومهما بدا هذا النص صعب التصديق لمن جرب ان يدحرج كرية الى ما لا نهاية (ان كان ذلك ممكنا ولم يتدخل اي تأثير يعيق حركة الكرية

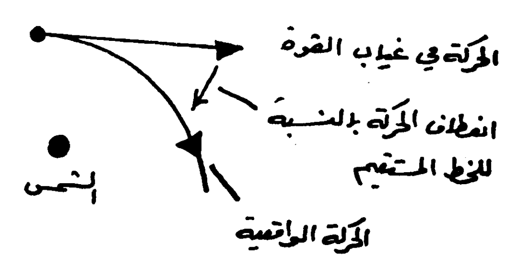
كالا حتكاك بلوح الخشب او سواه) فان الكرية فد تستمر دون توقف بسرعة ثابتة .

أما الخطوة التي تلت كل ذلك فقد خطاها نيوتن الذي ناقش السؤال التالي : « اذا لم تذهب في خط مستقيم ، فما مغزى ذلك عندئذ ؟ » وأعطى الجواب التالي : لابد من قوة لكي تتغير السرعة بأي شكل كان . فاذا دفعتم مثلا كرية في الاتجاه الذي تتحرك اليه فانها تتسارع . ثم اذا رايتم انها قد غيرت اتجاهها فلا بد ان قوة جانبية قد أثرت عليها . ويمكن للقوة ان تقاس كجداء لكميتين .

بكم تتغير السرعة خلال برهة زمنية قصيرة ؟ هذا هو مانسميه التسارع ، واذا ضربناه بعدد ، يسمى كتلة الجسم أو عامل عطالته ، فان هذا كله يعطي القوة ؛ ويمكن ان نقيسها . فاذا دورنا مثلا فوق رأسنا حجرا مربوطا بخيط نشعر أن علينا ان نشد بالخيط ، وسبب ذلك ان سرعة الحجر على دائرته ، رغم ثباتها ، تغير اتجاهها ؛ لابد اذن من قوة تشد الخيط باستمرار نحو الداخل ، وهي متناسبة مع الكتلة .

فلو اننا اخذنا جسمين مختلفين ودورناهما فوق الرأس ، واحدا بعد الاخر ولكن بنفس السرعة ، وقسنا قوة الشد التي يجب ان نمسك بها كلا منهما لوجدنا ان هاتين القوتين تختلفان بنفس معدل اختلاف الكتلتين .

ان هذه طريقة لقياس الكتلة بواسطة القوة اللازمة لتغيير سرعتها . ومن هنا رأى نيوتن (ونحن نسوق هذا المثال لبساطته) ان الكوكب الذي يرسم دائرة حول الشمس لاحاجة به البتة الى قوة خارجيةتجعله ينفصل جانبيا وفق مماس مساره . ولو لم يكن الكوكب خاضعا الى أية قوة لاستمر في خط مستقيم لاترى فيه عوجا ولا أمتا . لكن الواقع أن الكوكب لايسير في خط مستقيم ولا يتواجد بعد برهة ما في المكان الذي كان عليه ان يوجد فيه لو انه كان حرا من تأثير أية قوة ، بل اننا نجده قد انعطف نحو الشمس (شكل ٣) .



شكل ٣

وبتعبير آخر يبدو وكأنه اريد لسرعة الكوكب وحركته ان تنعطفا نحو الشمس .وهكذا فان كل ما على الملائكة ان تفعله هو ان تخفق بجناحيها باستمرار باتجاه الشمس .

لكن الحركة التي تقر الكوكب في خطه المستقيم ليس لها سبب معروف . ولم يمكن حتى الآن معرفة لماذا تسير الاشياء في اندفاعها الى الامام فليس لمبدأ العطالة اصل معروف . وبالرغم من عدم وجود الملائكة فان الحركة تستمر . لكن الانعطاف نحو الشمس يحتاج الى قوة ، ولقد اتضح ان القوة تتجه نحو الشمس . والواقع أن نيوتن تمكن من البرهان على أن قانون المساحات المتساوية الممسوحة في فترات متساوية هو نتيجة مباشرة للفكرة القائلة بأن كل تغيرات السرعة تتجه بدقة نحو الشمس حتى في حالة الاهليلج ، وباستطاعتي ان اريكم في محاضرتي القادمة بالتفصيل كيف يتم ذلك .

وبموجب هذا القانون اكد نيوتن فكرة ان القوة تتجه نحو الشمس. وبمعرفة كيف تتغير ادوار[1] مختلف الكواكب بتغير المسافات بينها وبين الشمس يمكن معرفة كيف تتغير القوة عندما تتغير المسافة . وقد

---

(١) جمع دور وهو الزمن الذي يستغرقه الكوكب للقيام بدورة كاملة . (المترجم)

تمكن نيوتن من التأكيد على أن القوة لابد وأن تتغير كما يتغير مقلوب مربع المسافــة .

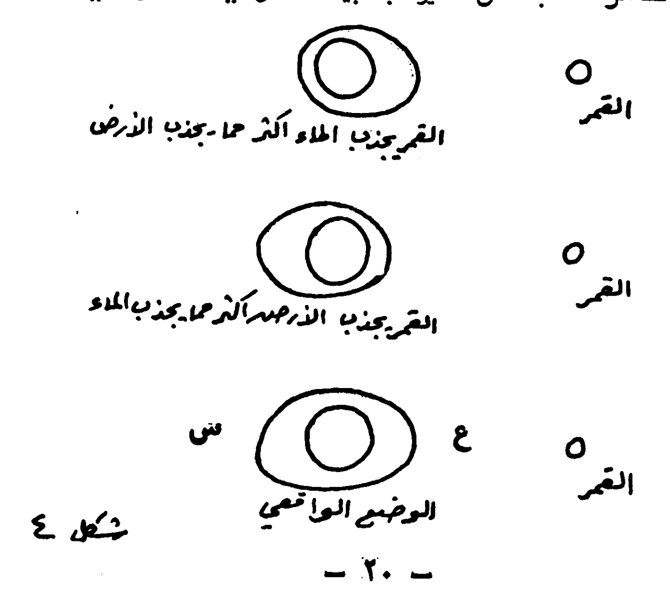
لهذا الحد لم يقل نيوتن أي شيء جديد ، لانه قدم فقط فكرتين كان كبلر قد قدمهما بتعبير آخر ، لان احدى الفكرتين تكافىء تماما القول بأن القوة تتجه نحو الشمس أما الاخرى فتكافىء القول بأن القوة تتغير كما يتغير مقلوب مربع المسافة .

لكن الناس كانوا قد راوا في نظاراتهم الفلكية التوابع (الاقمار) التي تدور حول المشتري . وهذا يشبه جملة شمسية صغيرة وكأن التوابع تنجذب نحو المشتري ، والقمر يدور حول الارض وينجذب بنفس الكيفية . لكأننا نقول ان أي شيء يجذب أي شيء . والفكرة بعدئذ كانت تعميم ذلك والقول بأن كل الاشياء تتجاذب . ولوكان الامر هكذا فان الارض يجب ان تجذب القمر كما تجذب الشمس الكوكب . على اننا نعلم سلفا ان الارض تجذب الاشياء ــ لانكم جميعا جالسون بكل اتزان على كراسيكم بالرغم من رغبتكم في أن تسبحوا في الهواء ! ونحن نعلم جميعا ، من ظاهرة التثاقل ، أن الاجسام فوق الارض مجذوبة نحو الاسفل . ولكننا ندين لنيوتن بفكرة ان التثاقل الذي يمسك بالقمر في مداره ربما كان هو بالذات الذي يجذب الاجسام نحو الارض .

من السهل أن تحسبوا بكم يهبط القمر في الثانية الزمنية الواحدة. فأنتم تعرفون أبعاد مداره وتعلمون أنه يستغرق شهراً ليدور حــول الارض . ولو حسبتم كم يقطع في الثانية الواحدة لامكنكم ان تحسبوا بكم يهبط المدار الدائري للقمر تحت الخط المستقيم الذي كان على القمر أن يسلكه لو لم يتخذ الطريق الذي يسير فيه فعلا . وهذه المسافة تساوي أقل بقليل من ميليمتر ونصف . فالقمر يبعد عن مركز الارض بما يساوي ٦٠ مرة مما نبعد نحن عنه . ونحن موجودون على بعــد ٦٤٠٠ كيلو متر من هذا المركز . فالقمر يقع اذن على بعد ٣٨٤٠٠٠ كيلو متر من مركز الارض . فاذا كان قانون مقلوب مربع المسافة صحيحا فان الاجسام على سطح الارض يجب ان تهبط خلال ثانية زمنية واحدة

بمسافة تساوي ٥ر١ مم × ٣٦٠٠ (أي مربع ٦٠) لان قوة الجذب تضعف من هنا الى القمر بمقدار (٦٠ × ٦٠) مرة بموجب قاون مقلوب مربع المسافة . لكن الجداء ٥ر١ مم × ٣٦٠٠ يساوي تقريبا خمسة امتار . وبالفعل كان معلوما منذ قياسات غاليله أن الاشياء تهبط عند سطح الارض بمقدار خمسة امتار خلال الثانية الزمنية الاولى . هذا يثبت اذن ان نيوتن كان على الطريق الصحيح ولايجب ان نعود الى الوراء . لان هذا الموضوع الجديد الذي كان يبدو مستقلا تماما ، الا وهو دور القمر على مداره وبعده عن الارض ، قد امكن ربطه بموضوع اخر هو المسافة التي يهبطها ، خلال ثانية واحدة ، جسم يسقط قرب سطح الارض . وهذا يعطينا الثقة الكاملة بأن كل شيء يسير على مايرام .

وبالاضافة الى ذلك تنبأ نيوتن بأشياء اخرى كثيرة . فقد حسب كيف يجب ان يكون شكل المدارات بموجب قانون مقلوب المربع ، فوجد أن شكلها يجب ان يكون بالفعل اهليلجيا — وبهذه الصورة حصل على القوانين الثلاثة انطلاقا من اثنين . وفوق ذلك فان عدة ظواهر جديدة قد اكتسبت تفسيرات واضحة . ذلك مثلا شأن ظاهرة المد والجزر : ان هذه الظاهرة ناتجة عن تأثير جاذبية القمر في الارض وفي مياهها .



شكل ٤

ان هذه الفكرة قد خطرت لبعض الناس قبلئذ ولكن بقيت الصعوبة التالية : اذا كان القمر يجذب المياه فلا يجب ان يحدث المد سوى مرة واحدة في اليوم تحت القمر ، لكننا نعلم أن المد يحدث وسطيا مرة كل اثنتي عشرة ساعة ، اي مرتين في اليوم . كما خطرت لآخرين نظرية اخرى تؤدي الى نتيجة مغايرة . وبموجب نظريتهم يجذب القمر الارض على حساب الماء . لكن نيوتن كان اول من فهم كيف تجري الامور : ان القوة التي يسلطها القمر على الارض والماء هي نفسها من اجل المسافة نفسها ؛ لكن الماء (انظر الشكل ٤) في المنطقة ع أقرب الى القمر من الارض الصلبة وابعد منها عن القمر في المنطقة س . فالماء في ع اشد انجذابا من الارض الصلبة بينما هو ، في س ، اقل انجذابا منها . وبموجب ذلك فان مجموع هذين الامرين هو الذي يولد المد المضاعف .

الواقع أن الارض تدور هي ايضا كما يفعل القمر . وان القوة التي يسلطها القمر على الارض هي قوة متوازنة . ولكن ماهي القوة الاخرى التي توازنها ؟ انها ناتجة من واقع ان الارض ترسم هي ايضا دائرة كما يرسم القمر دائرة ليوازن قوة الجذب التي تسلطها الارض عليه . ومركز الدوران هذا موجود فيمكان ضمنالارض . اي أن الارضوالقمر يدوران حول مركز مشترك (١) وهذا مايؤدي الى توازن القوى المتسلطة على الارض الصلبة . لكن الماء في المنطقة س اقل انجذابا الى القمر بينما هو في المنطقة ع اكثر انجذابا ، مما يتسبب في نتوئين ، كل نتوء في جهة . وهكذا تم في نهاية الامر تفسير ظاهرة المد وحدوثها مرتين في اليوم . كما ان اشياء كثيرة اخرى قد توضحت : الارض كروية لان كل شيء ينجذب الى داخلها . انها ليست كروية تماما لانها تدور حول محورها ولان المناطق البعيدة عن هذا المحور قد ابتعدت عنه قليلا لكي تتوازن . ان الشمس والقمر كرويان الخ .

---

(١) ان هذا المركز هو مركز الثقل (قل مركز العطالة) لجملة الارض والقمر معا ، وهو يقع على المستقيم الذي يصل بين مركزيهما ، ولو وجد انسان في المركز المشترك لرأى ان الارض والقمر يدوران كلاهما حوله بسرعة دوران واحدة . اما القوة التي توازن قوة التجاذب بين الارض والقمر فهي القوة العطالية (التي يسميها الفيزيائيون القوة النابذة) الناتجة من هذا الدوران والتي تكلم عنها المؤلف سابقا . (المترجم)

وهكذا ، كلما تقدم العلم وغدت عمليات القياس اكثر فاكثر دقة اتضحت بشكل ساطع صحة قانون نيوتن ، واكثر التحقيقات عناية اجريت على توابع (اقمار) كوكب المشتري . فلو رصدنا حركات هذه الاقمار بعناية خلال فترات زمنية طويلة لتسنى لنا أن نفحص فيما اذا كان كل شيء يتم وفق نيوتن . لكن ذلك لم يحدث ، لدى التجربة ، كما كان متوقعا . فاقمار المشتري بدت ان لها تسبيقا بثمانية دقائق حينا وتأخيرا بثمانية دقائق حينا اخر وذلك بالنسبة لتوقيت زمني تم حسابه بموجب قوانين نيوتن . وقد لوحظ أن التسبيق يحدث عندما يكون المشتري اقرب الى الارض ، والتأخير عندما يكون ابعد عنها ، وهذا امر عجيب ! لكن اولاوس رومر (فلكي دانمركي ١٦٤٤ — ١٧١٠) وثق بقانون نيوتن وتوصل الى النتيجة الهامة بأن النور يستغرق فترة زمنية كي يسافر من أقمار المشتري الى الارض ، وأننا عندما ننظر الى هذه الاقمار لانراها في المكان الذي توجد فيه فعلا حين نراها ، ولكن نراها في المكان الذي كانت فيه قبل فترة زمنية هي الفترة التي استغرقها نورها كي يصل الينا منها . فعندما يكون المشتري قريبا منا فان النور يستغرق للوصول الينا فترة اقصر من الفترة التي يستغرقها عندما يكون المشتري بعيدا عنا . وعلى هذا الاساس صحح رومر التسبيقات والتأخيرات الملحوظة ، بحسب الفرق بين الفترتين المذكورتين . وقد استطاع بهذه الصورة حساب سرعة النور ، فكان ذلك اول برهان على ان النور ينتشر بسرعة محدودة(١) .

وهنا اريد ان الفت انتباهكم الى هذه النقطة بالذات ، لانها توضح كيف يمكن استعمال قانون ، اذا كان صحيحا ، لاكتشاف قانون آخر. فاذا كنا على ثقة من قانون ما وبدا لنا ان شيئا ما قد انحرف عما كنا نتوقع فان هذا الشيء يمكن ان يوحي لنا بفكرة اخرى . فلو اننا ماكنا اكتشفنا قانون التثاقل لاحتجنا الى وقت اطول كي نجد سرعة النور لاننا لا نستطيع عندئذان نتوقع سلوك اقمار المشتري . ولقد تطور هذا التدرج الى شلال من الاكتشافات ، كل اكتشاف جديد يجلب معه

(١) لقد كانت هذه النقطة في عصر رومر موضع خلاف بين العلماء ، اذ كان بعضهم يقول بأن النور ينتشر آنيا اي بسرعة لامتناهية في الكبر . (المترجم) .

وسائل تعين على اكتشافات اخرى . ومن هنا انطلق الشلال الذي مازال يتدفق منذ اربعمائة سنة ويجري بنا بكل سرعته .

وبرز مشكل آخر : ان الكواكب لايجب ان ترسم حقا اهليلجات ، لان هذه الكواكب ، وبموجب قوانين نيوتن نفسها ، ليست منجذبة الى الشمس فقط ، بل انها ايضا تتجاذب قليلا فيما بينها ، قليلا جدا ، لكن هذا القليل جدا موجود ولابد له من ان يحدث تحويرا للحركة . فالمشتري وزحل واورانوس هي كواكب معروفة بضخامتها ، وقد اجرى العلماء الحسابات اللازمة لمعرفة الكميات التي يجب ان تتحور بموجبها مداراتها عن هليلجات كبلر المثالية ، هذه التحويرات الناجمة عن تجاذبها فيما بينها . وبنتيجة الحسابات والارصاد تبين ان المشتري وزحل قد انسجمت معها ، لكن سلوك أورانوس كان عجيبا ، وها هي فرصة اخرى لانتقاد قوانين نيوتن . لكن صبرا ! فلقد اقترح رجلان ؛ هما آدامس ولوفيريه(1) ، كلا لوحده وفي وقت واحد تقريبا ، فكرة وجود كوكب مجهول يؤثر في حركة أورانوس ؛ وكتب كل منهما الى مرصده يقول : « صوبوا نظارتكم الفلكية في هذا الاتجاه وستجدون هناك كوكبا » . فقال احد المراصد تعليقا على ذلك : « هذا محال ! كيف يمكن لرجل جالس امام قصاصات أوراقه واقلامه ان يدلنا اين يجب ان ننظر لنجد كوكبا جديدا » لكن المرصد الاخر كان اكثر ... ، المهم انه كانت له ادارة اخرى ، فاكتشف نبتون !

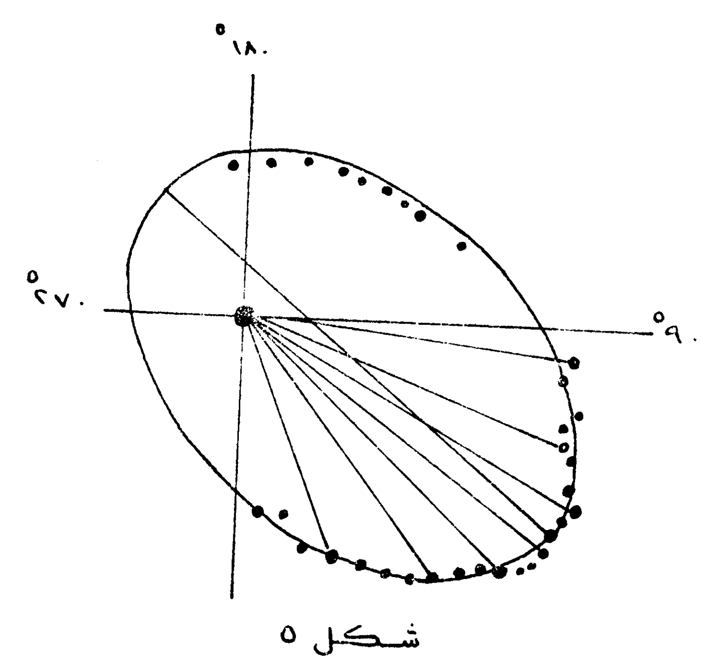
هذا وقد ظهر حديثا ، في أوائل القرن العشرين ، ان حركة الكوكب نبتون ليست على مايرام . فنشأ عن ذلك بعض الصعوبات وبقيت دون تفسير حتى اوضح اينشتاين ان في قوانين نيوتن خللا طفيفا ولابد من تحويرها .

وهنا يبرز سؤال جديد : الى أي حد يصح هذا القانون ؟ هل يبقى

---

(1) جون آدامس (١٨١٩ – ١٨٩٢) فلكي انكليزي ، اوربان لوفيريه (١٨١١ – ١٨٧٧) فلكي فرنسي .

صحيحا خارج المجموعة الشمسية ؟ ان الكواكب تدور فعلا ويمكن ان تروا على الشكل ٥ المدار الذي ترسمه .



شكل ٥

من الواضح ان الكواكب تتجاذب وتدور في اهليلجات كما نتوقع . وقد سجلنا بعض الاماكن في آناء مختلفة تتوالى في اتجاه حركة عقارب الساعة . وسترضون عن كل ذلك حتى تكتشفوا ان مركز الدوران لايحتل محرق الاهليلج لكن ينحرف عنه قليلا . فهل يوجد في هذا القانون خلل ؟ كلا ! لكن الله لم يكتب لنا ان نرى هذا المدار مواجهة بل جانبيا . فاذا امسكتم اهليلجا وسجلتم موقعي محرقية واملتم الورقة قليلا ونظرتم اليها اسقاطا فسترون ان المحرق ليس موجودا بالضرورة في محرق الصورة المسقطة . فالمدار يبدو لنا بهذه الصورة لان مستوية مائل في الفراغ .

فالتجاذب التثاقلي بين النجوم هو الذي يجعلها متماسكة في هذه المجرّة . وان توزع المادة وتقدير المسافات يسمحان بالتأكد وسطيا من صحة قانون القوة بين النجوم ... ولقد وجد بالطبع ان قانون مقلوب المربع صحيح وسطيا .

ان دقة الحسابات والقياسات ، التي تتناول النجوم ، اقل بكثير من الدقة التي نحصل عليها في المجموعة الشمسية ، وان حقل التثاقل يطال ما هو ابعد من هذه المجموعة ، لانه يلزم هنا ايضا وجود قوة كي يتماسك هذا العالم بمجموعه . وعندما نصل الى ذلك المدى السحيق لانجد طريقة للتحقق من صحة قانون مقلوب المربع ؛ ولكن يبدو ان ليس ثمة شك بأن التثاقل يسود حتى في تلك المناطق النائية وضمن التجمعات النجمية الكبيرة . والمجرات مبعثرة في حدود ... ٥٠٠ الى ... ٦٠٠ سنة ضوئية بينما لاتتجاوز المسافة بين الارض والشمس ثماني دقائق ضوئية .

لدينا اذن اثباتات مباشرة على أن قوى التثاقل تطال هذه الابعاد ، أي مايشكل عشر أو عشير إمتداد العالم . فحقل التثاقل الارضي ليس له حدود ، بالرغم مما تقرأون من ان شيئا ما قد تخلص من حقل الجاذبية . لكنه يتضاءل تدريجيا لدى ازدياد المسافة كما يتضاءل مقلوب مربعها، أي أنه ينزل الى ربع قيمته كلما ازدادت المسافة بضعفي قيمتها حتى يتلاشى في فوضى الحقول الاشد منه الناجمة عن نجوم أخرى . وكما تفعل النجوم المجاورة لها فان الارض تجذب النجوم الاخرى في مجرتنا ، وكلها معا تجذب المجرات الاخرى فتؤلف معها مجموعة مجرات تسبح في الفضاء الرحيب . فليس لحقل جاذبية الارض التثاقلي اذن حدود لكنه يتضاءل شيئا فشيئا وفق قانون مقلوب المربع ويصل على الارجح الى تخوم الكون النائية .

هذا وان قانون التثاقل يختلف عن قوانين كثيرة سواه . وهو بدون شك هام جدا في تناسق ميكانيكية الكون وله في هذا الصدد تطبيقات عديدة . لكن الواقع ان معرفة قوانين التثاقل ، بعكس معرفة قوانين فيزيائية اخرى ، لاتفيد كثيرا في الشروح العملية . وفي هذا المجال فان المثال الذي اعتمدته ليس نموذجيا . وبهذه المناسبة نقول : ان من المستحيل ، عندما نعتمد مثالا نضربه على شيء ما ، أن نجد مثالا لايكون غير نموذجي بحال أو اخرى .

وهنا تكمن الروعة في هذا العالم . فالالمام بقانون التثاقل لاتتعدى تطبيقاته ، التي تخطر لي ، التنقيب الجيوفيزيائي والتنبؤ عن المد والجزر ؛ ويفيد اليوم في دراسة محارك الاقمار الصنعية وسابرات الفضاء التي نرسلها عاليا بين النجوم ؛ واخيرا ، وهذا عصري ايضا ، في حساب مواقع الكواكب ، مما يفيد جدا في التنبؤات التنجيمية التي ينشرها المنجمون في الصحف . عجيب امر هذا العالم الذي نعيش فيه والذي لايستخدم تقدمنا العلمي الجديد الا لتخليد سخافات عتيقة عمرها آلاف السنين !

ولابد أن اذكر المجالات الهامة التي يلعب فيها التثاقل بالفعل دورا اساسيا في تطور الكون ، واحد اهمها هو تشكل النجوم الجديدة .

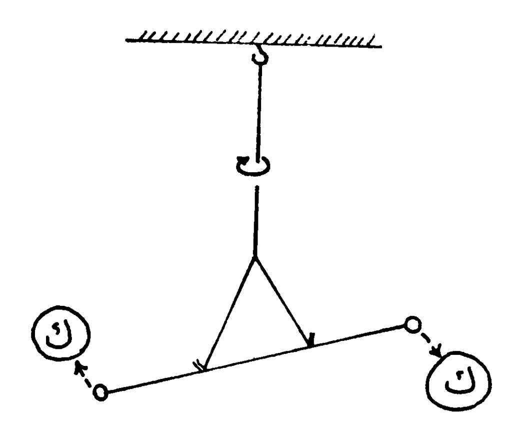
قد تكون نقطة البدء في هذا الحادث نوع من الموجة الصدمية اما الباقي فان التجاذب التثاقلي هو الذي يلمّ الغاز ويرصه أكثر فأكثر حتى تتكاثف هذه الغيوم الغازية الكبيرة وضبابها بشكل كرات ؛ وبما أن هذه الكرات تستمر في التهافت ، كلا على الكل ، فان الحرارة الناجمة عن تراطمها تلهب فيها النار وتحولها الى نجوم .

هكذا تولد اذن النجوم ، عندما يبالغ التثاقل في رص كتلة الغاز . وقد يحدث أن تنفث النجوم لدى انفجارها غبارا وغازات ، ثم تتجمع هذه الغازات وهذا الغبار من جديد لتؤلف بدورها نجوما جديدة — ان هذا يشبه الحركة الدائمة .

لقد برهنت سابقا على ان التثاقل يطال المسافات الكبيرة . لكن نيوتن يقول ايضا بأن كل شيء يجذب كل شيء سواه . فهل يتجاذب اي شيئين حقا ؟ وهل يمكن أن نتأكد من ذلك مباشرة دون أن ننتظر لنرى فيما اذا كانت الكواكب تتجاذب فيما بينها ؟ لقد تحقق كافنديش[1] من هذا مباشرة وذلك باستعمال الجهاز المرسوم في الشكل ٦ .

---

(١) هنري كافنديش ، ١٧٣١ — ١٨١٠ ، فيزيائي وكيميائي انكليزي



شكل ٦

كانت فكرته هي ان يعلق ، بخيط دقيق جدا من الكوارتز ، قضيبا يحمل في طرفيه كريتين متماثلتين وان يضع قرب طرفيه كرتين كبيرتين من الرصاص كما يرى على الشكل ٦ . يتسبب عندئذ التجاذب المتبادل بين كل كرية والكرة التي تجاورها في فتل الخيط فتلا ضعيفا جدا لان القوة التثاقلية بين الاجسام العادية ضعيفة جدا جدا ؛ ومن زاوية الفتل هذه أمكن حساب القوة بين الكرية والكرة . وبواسطة هذه التجربة يقول كافنديش انه « يزن الارض » . على أننا في اسلوب تعليمنا المتحذلق والموسوس لاندع طلابنا اليوم يتكلمون هكذا ؛ بل يجب أن يقال : « تقاس كتلة الارض » ففي هذه التجربة المباشرة تمكن كافنديش من قياس القوة والكتلتين والمسافة وان يعين بالتالي الثابت التثاقلي (ث) الوارد في دستور نيوتن . لكنكم ستقولون : « نعم ، ولكننا لم نتقدم أية خطوة. فنحن نعرف التجاذب ونعرف كتلة الجسم المجذوب ونعلم المسافة التي نحن ازاءها ولكننا لم نعلم لاكتلة الارض ولا الثابت (ث) ولم نعلم سوى حصيلتهما معا » . هذا صحيح . ولكننا بعد قياس الثابت ، كما هو بين الكرية والكرة ، نستطيع أن نحسب كتلة الارض انطلاقا من معرفة قوة جذب الارض .

لقد كانت هذه التجربة ، بصورة لامباشرة ، أول تعيين لوزن أو كتلة الكرة الارضية التي تتحملنا . وهذه نتيجة مدهشة . ولهذا السبب

اعتقد ان كافنديش قد اسمى تجربته عملية « وزن الارض » ولم يسمها « تعيين ثابت الثقالة » . على انه قد وزن عرضا ، وفي نفس الوقت ، الشمس وسواها لان جاذبية الشمس معروفة أيضا .

هذا ويوجد تأكيد آخر ، بسيط جدا ، لصحة قانون التثاقل وهو يتناول موضوع التناسب الدقيق مع الكتلة . فلو كان الجذب متناسبا بدقة مع الكتلة وكان رد الفعل متناسبا مع القوة ، وبما أن تغيرات السرعة ، في الحركات الناجمة عن قوة ، متناسبة عكسيا مع الكتلة ، لراينا ان جسمين من كتلتين مختلفتين يعانيان تغيرين متساويين للسرعة (أي تسارعين متساويين) في حقل تثاقلي واحد .

وهكذا فان جسمين مختلفين يسقطان نحو الارض على منوال واحد، في الخلاء على الاقل ، وذلك مهما كانت كتلتاهما . تلك هي تجربة غاليله القديمة في برج مدينة بيزا المائل . وعلى هذا الاساس مثلا فان أي جسم من الاجسام الموجودة داخل القمر الصناعي يدور حول الارض كأي جسم آخر موجود خارجه . ولهذا السبب يبدو الجسم الداخلي وكأنه معلق من تلقاء ذاته في الفضاء داخل حجرة القمر الصناعي . وهذه النتيجة المثيرة جدا ناجمة عن ان قوة الجذب متناسبة تماما مع الكتلة وان ردود الفعل متناسبة عكسيا معها .

ولكن ماهي الدقة في كل هذا ؟ لقد قام اتفوس (١) عام ١٩٠٩ بذلك القياس كما اجراه مؤخرا ديك (٢) بدقة اكبر بكثير . واتضح صلاح هذا القانون بدقة تقارب واحداً من مليار . فالقوى تتناسب فعلا وبدقة مع الكتلة . ولكن ما العمل للحصول على دقة من هذا المستوى؟ افترضوا انكم اردتم اختبار هذا الصلاح في حالة الجذب الشمسي ، وانتم تعلمون ان الشمس تجذبنا كلنا وتجذب الارض معنا . ولكن افترضوا انكم اردتم ان تعرفوا اذا كان الجذب متناسبا تماما مع العطالة . لقد أجريت

---

(١) البارون لورند فون اتفوس ، ١٨٤٨ - ١٩١٩ ، فيزيائي هنغاري .

(٢) روبير هنري ديك فيزيائي امريكي .

التجربة في بادىء الامر على خشب الصندل ثم على الرصاص ثم على النحاس ، وفي المدة الاخيرة ، اجريت على البولي اتيلين . فالارض تدور حول الشمس : وهذا مايجعل الاجسام تنفر بعطالتها ، ونفورها يتناسب تماما مع عطالتها ، ولكنها تنجذب نحو الشمس انجذابا يتناسب مع كتلتها الواردة في قانون التثاقل . وعلى هذا الاساس اذا كان جسمان منجذبين الى الشمس ونافريين في نفس الوقت بالعطالة ولكن بمعدلين مختلفين فان احدهما سيكون بالنتيجة منجذبا الى الشمس والاخر نافرا عنها . فاذا ثبتناهما في طرفي قضيب معلق بدوره بخيط من الكوارتز ، كما في تجربة كافنديش ، فسنرى عندئذ أن الخيط ينفتل نحو الشمس . لكن الخيط لاينفتل ، لدى التجربة ، بالدقة المتوقعة ، ونستدل من ذلك أن جذب الشمس للجسمين متناسب تماما مع القوة النابذة التي ليست سوى القوة العطالية . ينتج من ذلك ان الجذب المتسلط على جسم ما متناسب تماما مع عامل عطالته اي مع كتلته .

وهنا يبرز شيء يلفت النظر بصورة خاصة . ان قانون التربيع العكسي (أي قانون مقلوب المربع) يظهر في مجالات علمية اخرى ، في قوانين الكهرباء مثلا . لان الكهرباء تولد ايضا قوى تناسب عكسي مع مربع المسافة بين شحنتين كهربائيتين هذه المرة . يمكن اذن أن نفكر أن مقلوب مربع المسافة له مغزى عميق . لكن احدا لم يتمكن حتى الان من أن يجعل من الكهرباء والتثاقل وجهين مختلفين لشيء واحد ؛ فنظرياتنا الفيزيائية ، اي قوانين الفيزياء ، تؤلف اليوم كوما من قطع واجزاء لاتتراكب على خير مايرام . أي اننا لانملك بناء وحيدا يمكن أن نستنتج منه كل شيء ولكننا امام عدة قطع لاتتراكب فيما بينها تماما . ولهذا السبب فانا ، في محاضراتي هذه، مضطر لان اظهر لكم الخواص المشتركة لمختلف قوانين الفيزياء ، لا أن احدثكم عن ماهية **قانون** الفيزياء . فنحن لم ندرك بعد الوشائج التي تربط بين شتى القوانين . ولكن الغريب هو أن نجد شيئين متطابقين في اثنين من هذه القوانين . ولنعد الى الكهرباء .

ان القوة الكهربائية تتغير مع المسافة كمقلوب مربعها لكن الشيء الجديد

بالملاحظة هو الفرق الهائل بين شدة القوى الكهربائية وشدة القوى التثاقلية فمن اراد أن يصنع كهرباء وتثاقلا انطلاقا من شيء واحد سيرى أن الكهرباء أشد بأسا من التثاقل ، لدرجة يصعب معها ان يصدق بوجود اصل مشترك للاثنتين . ولكن كيف أستطيع أن أؤكد ان احداهما اشد بأسا من الاخرى؟ ان هذا يتعلق بكمية الشحنة التي لديكم وبكمية الكتلة . فليس من الممكن ان نتكلم عن شدة التثاقل بالقول : « آخذ قطعة من حجم معين »، لان المتكلم هو الذي يختار الحجم . فاذا حاول أن يحصل على شيء ما من انتاج الطبيعة فان العدد البحت الذي يعبر عن كمية هذا الشيء لاشأن له بالسنتمترات أو بالسنوات ولا بابعادنا الخاصة ؛ ويمكن أن نتوصل الى ذلك بالطريقة التالية . نأخذ جسيما عنصريا كالالكترون ، ولو اخذنا جسيما آخر لما اختلفت النتيجة كثيرا . ولكن لنأخذ الالكترون كمثال . فالقوة التي يتنافر بها الكترونان تتناسب مع مقلوب مربع المسافة بينهما بسبب الكهرباء ، ولكنهما يتجاذبان بموجب مقلوب مربع المسافة أيضا بسبب التثاقل .

سؤال : ماهو حاصل قسمة القوة الكهربائية على القوة التثاقلية ؟
الجواب موضح في الشكل ٧ .

بين الكترونين

$$\frac{\text{التنافر الكهربائي}}{\text{التجاذب التثاقلي}} = ٤,١٧ \times ١٠^{٤٢}$$

= ٤ ١٧٠ ... ...

شكل ٧

ان حاصل قسمة التنافر الكهربائي على التجاذب التثاقلي هو عدد متبوع بذيل يتألف من نحو ٤٢ صفرا . ان في هذا سر عميقا . من ايـن يمكن أن يخرج عدد بهذه الضخامة ؟ فلو حصلنا ، يوما ما ، على نظرية تخرج منها هاتان القوتان فكيف يمكن أن تخرجا منها بمثل هذا الاختلاف؟ ماهي المعادلة التي يتألف حلها من نوعين من القوى ، جذبي وتنافري . بهذه النسبة الهائلة ؟

لقد فتش الناس ، في مجالات اخرى ، عن نسبة تبلغ هذا الكبر . فهم يأملون مثلا في أن يجدوا عددا كبيرا آخر . واذا كنتم تريدون عددا كبيرا فلماذا لاتقسمون قطر العالم على قطر البروتون ؟ ستذهلون لوعلمتم أنكم ستجدون بالفعل عددا مع ٤٢ صفرا . وهنا يتقدم الاقتراح المثير بأن نسبة القوى الكهربائية الى القوى التثاقلية هي نسبة قطر العالم الى قطر البروتون . لكن العالم هو الان في توسع وهذا يعني أن ثابت التثاقل (ث) سيتغير بمرور الزمن . وهذا ، بالرغم من امكانية حدوثه ، لايوجد مايثبت واقعيته . وفي الواقع يوجد عدة أشياء تشير الى أن ثابت التثاقل لـم يتغير . ومازال سر هذا العدد الهائل خافيا تماما .

ولكي ننتهي من نظرية التثاقل لابد أن اضيف شيئين . أولهما ان آينشتاين اضطر الى تحوير قوانين التثاقل بموجب مبادئه في النسبية . وأول هذه المبادىء يقول : لاشيء يمكن أن يقع آنيا . بينما يقول نيوتن بأن القوة تؤثر آنيا . فكان على أينشتاين ان يعدل قوانين نيوتن . لكن هذه التعديلات ليس لها سوى آثار ضعيفة . واحد هذه الاثار يتلخص في أن جميع الكتل في حالة انجذاب ؛ وبما أن للضوء طاقة والطاقة تكافىء الكتلة ، فان الضوء في حالة انجذاب . وعلى هذا الاساس فالضوء المار بالقرب من الشمس لابد أن ينحرف : وهذا واقع . والقوة التثاقليةتتحور قليلا هي أيضا وبالقدر اللازم تماما لاحتواء الخلل الملحوظ في حركـة كوكب عطارد .

واخيرا فيما يخص قوانين الفيزياء في سلم الصغائر فقد وجـد ان سلوك المادة في هذا المجال يختلف كثيرا عما هو في سلم الكبائر . فكيف

تتصرف المادة في سلم الصغائر اذن ؟ ذلك هو موضوع مايسمى بالنظرية الكمومية للتثاقل . على انه لايوجد في الوقت الحاضر نظرية كمومية للتثاقل . فنحن لم ننجح بعد تماما في بناء نظرية تتفق مع مبادىء الارتياب، المبادىء الكمومية .

والآن ستقولون لي : « لابأس ، لقد تحدثت لنا عن مجريات الامور . ولكن التثاقل ، ماهو ؟ ومن اين يأتي ؟ فأنت لن تزعم أن الكوكب يتطلع الى الشمس ليرى على أية مسافة هي ، ثم يحسب مقلوب مربع هذه المسافة ويقرر أن يتحرك وفق هذا القانون » . الواقع أنني ، بالرغم من القانون الرياضي الذي اعطيته ، لم أتعرض ابدا الى الآلية . ولكنني سأناقش ذلك في المحاضرة القادمة : « رابطة الرياضيات بالفيزياء » .

وفي نهاية هذه المحاضرة أود أن الح على الصفات المشتركة بين التثاقل والقوانين الاخرى التي ذكرناها على الطريق . فصيغة قانون التثاقل هي، أولا ، صيغة رياضية وكذلك صيغة القوانين الاخرى . وهي ، ثانيا ، ليست مضبوطة ؛ وقد اضطر آينشتاين الى تعديلها . ونحن نعلم أنها ليست صحيحة تماما لانها تحتاج الى أن ندخل فيها النظرية الكمومية. وهذا ايضا شأن القوانين الاخرى . فهي أيضا غير مضبوطة . وهنالك دوما جوانب غامضة ، جوانب لابد أن ندقق فيها أكثر فأكثر . وسواء كان هذا أم لم يكن صفة من صفات الطبيعة فانه على كل حال يكتنف جميع القوانين كما نعرفها اليوم . وربما كان ذلك مجرد نقص في معارفنا .

لكن التثاقل بسيط ، وهذا هو الجانب الذي يثير الدهشة أكثر من أي شيء فيه . انها البساطة التي تتجلى في صيغته على كمالها . هذه الصيغة التي لاتترك لغموض مجالا يضل فيه من قرأها . انها البساطة التي تولد الجمال . ان بنيتها بسيطة . لكني لا أقول ان تطبيقاتها بسيطة ـ فحركة الكواكب والاضطرابات التي تسببها فيما بينها هي أشياء حسابها معقد جدا . وان تتبع جميع النجوم في حركاتها ضمن كوم مكور هو أمر يتعدى امكانياتنا . فهذا القانون معقد في تظاهراته . لكن بنيته الاساسية

بسيطة ، وكذلك مجموعة الافكار التي تحكمه . وهذه جميعا سمات تشترك فيها جميع قوانيننا . فهي كلها بسيطة رغم أن تظاهراتها الملموسة وافرة التعقيد .

واخيرا تأتي «عالمية» قانون التثاقل ،بمعنى أن هذا التثاقل يمتد ليشمل مناطق العالم النائية . وكذلك يأتي فكر نيوتن الذي ، رغم أنه لم يهتم الا بالمجموعة الشمسية ، استطاع أن يتنبأ بما سيحدث لتجربة كافنديش ، تلك التجربة التي تؤلف ، بكرتيها المتجاذبتين ، نموذجامصغرا للمجموعة الشمسية ، ذلك النموذج الذي يصبح ، بعد تكبيره عشرة ملايين مليون مرة ، مجموعة شمسية . ولو تم تكبيره عشرة ملايين مرة اخرى لوجدنا مجرات تتجاذب بالضبط كما يريد القانون نفسه . ان الطبيعة لاتستعمل سوى الخيوط الطويلة لتنسج النموذج الذي يؤلف بتكراره كامل المنسوج ، مما يجعل اصغر قطعة من هذا النسيج تنبىء عن بنية القماش كله .

٢

رابطة الرياضيات بالفيزياء

عندما نتمعن في تطبيقات الرياضيات والفيزياء ندرك ، دون عناء ، فائدة الرياضيات في الامور المعقدة التي تظهر فيها أعداد كبيرة . صحيح في علم البيولوجيا مثلا ، أن عبث الفيروس في الجرثومة ليس رياضيا . لكنكم اذا شاهدتم ذلك من خلال المجهر فسترون فيروسا صغيرا يتمرغ على جرثومة ذات شكل غريب (انها كلها من اشكال متخالفة) ، وربما راح ينفث فيها الحموض التي يفرزها . بيد اننا اذا أجرينا التجربة على ملايين الملايين من الجراثيم والفيروسات لاستطعنا ان نعلم الشيء الكثير بعد اجراء حسابات احصائية . يمكن أن نعلم اذا كانت الفيروسات تنمو في الجراثيم ، واذا كان من الممكن أن نحصل على سلالات جديدة وماهي نسب هذه السلالات . وهكذا نتمكن من دراسة الوراثة والاستحالات و ... الخ .

ولكي نضرب مثلا بسيطا على ذلك تصوروا لوحة واسعة مقسمة الى مربعات للعب الشطرنج أو الضاما . ان آلية النقلة ليست من الرياضيات في شيء ولكن ربما أمكنكم أن تتصوروا رقعة شطرنج عملاقة وذات بيوت عديدة جدا وعليها حشد كبير جدا من قطع اللعب . ربما أمكن عندئذ أن نحلل احسن النقلات او أن نحصي على الاقل النقلات الجيدة والنقلات السيئة بعد أن نمعن النظر ونقوم بمحاكات عميقة . فالمنطق المجرد الذي نستعمله هو من صلب علم الرياضيات . كما أن توصيل أسلاك الالات الحاسبة هو مثال آخر . فالزر الواحد من هذه الآلة ، اذا اعتبر لوحده، ليس من الرياضيات سواء كبستم عليه أم لا، وذلك رغم ان علماء الرياضيات يحبون أن ينطلقوا من هذا المنطق . ولكن لو أردنا أن نعلم ماسيحدث

في جملة كبيرة جدا مع كل ماتحويه من دارات وتوصيلات وازرار فلابد عندئذ من الرياضيات .

وأريد أن أقول ، منذ الان ، ان الرياضيات لها بالفعل حقل تطبيق واسع في علم الفيزياء لدى اجراء المناقشة التفصيلية للظواهر المعقدة ، وذلك بافتراض أن القواعد الاولية للعبة معروفة . وهذه النقطة بالذات يمكن أن تأخذ جل وقتي لو لم يكن علي سوى أن اناقش العلاقات بين الرياضيات والفيزياء . لكن هذه المحاضرة ليست سوى حلقة من السلسلة المخصصة أصلا لطبيعة علم الفيزياء ، فليس لدي الوقت لمناقشة مايجري في تلك الظروف المعقدة . وسأنتقل راسا الى موضوع آخر هو بالذات طبيعة القوانين الاساسية .

ونعود الى لعبتنا في الشطرنج فنطلق اسم القوانين الاساسية على القواعد التي تنظم انتقال القطع . يمكن هنا أن نستخدم الرياضيات ، في وضع معقد ، لاختيار نقلة جيدة ننفذها في ظروف معينة . لكن البساطة العميقة للقوانين الاساسية لاتتطلب سوى القليل من الرياضيات . وبكل بساطة يمكن أن نعبر عنها باللغة العربية .

لكننا في القوانين الاساسية للفيزياء ، وهذا أمر غريب ، نحتاج الى الرياضيات . وعلى هذا أسوق مثالين . أحدهما لا يحتاج لزاما الى الرياضيات أما الآخر فيحتاج اليها . والمثال الاول هو القانون المسمى ، في الفيزياء ، قانون فارادي والذي ينص ، في حوادث التحلل بالكهرباء (يقول بعضهم الكهرليز) ، على أن المادة التي تتوضع على أحد المسريين متناسبة مع شدة التيار . وهذا يعني ان المادة المتوضعة متناسبة مع الشحنة الكهربائية التي تعبر وعاء التحليل . ان هذا الامر يبدو رياضيا جدا . لكن الذي يحدث في الواقع هو أن الالكترونات التي تسري في السلك يحمل كل منها شحنة كهربائية . ولكن لنعرض الموضوع مثلا بالصورة التالية : اذا كان الالكترون الواحد يتسبب في توضيع ذرة واحدة فان عدد الذرات المتوضعة يساوي لزوما عدد الالكترونات التي مرت

ويتناسب بالتالي مع الشحنة التي عبرت السلك . ان هـذه الصـورة توضح ان هذا القانون ، ذا المظهر الرياضي ، لايتطلب أية معرفة عميقـة بالرياضيات ؛ فاذا كان القول بأن الالكترون الواحد يوضـع ذرة واحدة يمكن أن يعد من الرياضيات فليس هو ، على ما أرى ، من نوع الرياضيات التي أتحدث عنها هنا .

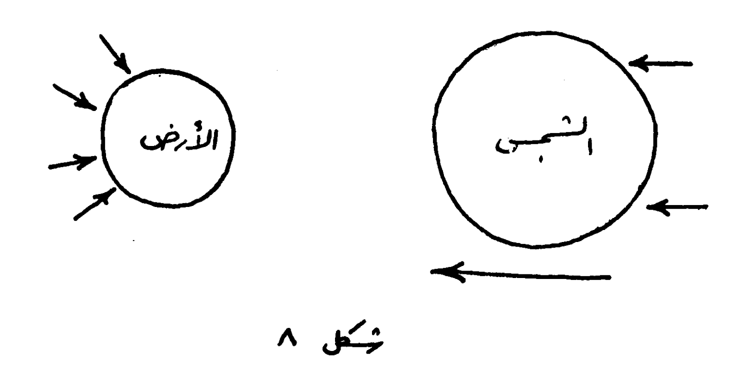
خذوا الآن ، كمثال آخر ، قانون نيوتن في التثاقل الذي ناقشت بعض جوانبه في محاضرتي السابقة . لقد أوردت لكم عندئذ المعادلة :

$$\text{ق} = \text{ث}\,\frac{\text{ك} \times \text{كَ}}{\text{م}^{2}}$$

لكي ادهشكـم بالسرعـة التي بواسطتها تستطيع الرياضيات ان تنقل المعلومات . لقد قلت عندئذ ان القوة متناسبة مع جداء كتلتي الجسمين وتتناسب عكسيا مع مربع المسافة بينهما وأن الاجسام تتفاعل مع القوة بتغيير حركتها باتجاه القوة بكمية متناسبة مع القوة ومتناسبة عكسيا مع كتلتها . فهذه الكلمات واضحة ولم يكن لزاما عليّ أن أكتب المعادلة . لكن المعادلة لها ملامح رياضية . ونحن نتساءل كيف يمكن أن يكون هذا قانونا اساسيا . ماذا يفعل الكوكب ؟ وهل ينظر الى الشمس ليعرف على أيـة مسافة هي ، ثم يقرر أن يحسب ، في آلته الداخلية الصغيرة ، مقلوب مربع هذه المسافة لكي يعرف بكم يجب أن ينتقل . من المؤكد أن هذا ليس هو التفسير لآلية الدوران. وانتم تريدون أن تعرفوا عنها أكثر من ذلك. كما حاول اناس كثيرون ان يذهبوا الى أبعد من ذلك . وفي عصر نيوتن طرح عليه بعضهم ، بخصوص نظريته ، القول التالي : « ان هذا ليس له اي معنى ! انه لا يفسر لنا شيئا على الاطلاق ! » فكان جوابه : « ان هذا يشرح لكم **كيف** تتحرك الاشياء وحسبكم ذلك . لقد شرحت لكم كيفية الانتقال لا سببه » . لكن الناس عموما لا يرضون اذا لم تفسر لهم الآلية ؛ وفي هذا الصدد أريد أن أشرح لكم نظرية من جملة النظريات التي طرحت ، أملا في أن تشبع فضولكم . انها توحي بأن هذا المفعول ناتج عن عدد كبير من المسببات الفردية ، مما قد يفسر ايضا صيغته الرياضية .

لنفترض أن هذا العالم تجوبه كميات كبيرة من جسيمات تمرق بسرعة كبيرة جدا وتأتي اليه بانتظام من جميع النواحي وتمر بنا عبورا دون أن تصيبنا الا نادرا . ونحن ، وكذلك الشمس ، شفافون تقريبا ازاءها ! تقريبا وليس تماما لان بعضها يصيبنا في الصميم .

انظروا عندئذ ما يحدث (شكل ٨)



شكل ٨

لوكانت الشمس غير موجودة فان الجسيمات تسقط على الارض من جميع الجهات . لكن الجسيمات النادرة التي تصيبها في الصميم ، طرقة بعد طرقة ، تسبب لها بعض الدفعات . لكن الشمس موجودة وهي تمتص قسما من الجسيمات التي تأتي من جهتها لان بعض الجسيمات لاتخترقها. وهذا ما يجعل اذن عدد الجسيمات التي ترد من جهة الشمس والتي تصادف هذا الحاجز ، أقل من تلك الواردة من الجهات الاخرى . ومن السهل ان نفهم انه كلما كانت الشمس بعيدة كانت نسبة الجسيمات التي تمتصها ضعيفة بالمقارنة مع مجموعة النواحي التي يمكن أن تأتي منها الجسيمات الى الارض ، ذلك لان قرص الشمس ، كما يبدو من الأرض ، يتناقص اتساعه بازدياد المسافة بين الأرض والشمس ـ تماما كما يتناقص مقلوب مربع المسافة. يكون نتيجة ذلك ان الارض تندفع عندئذ نحو الشمس ، أو قل تنجذب اليها بما يتناسب مع مقلوب مربع المسافة، وهذا الدفع ناتج عن عدد كبير من الافعال الصغيرة جدا ، اي الصدمات التي تتلقاها ، واحدة تلو الاخرى ، من جميع الجهات . ان هذا التفسير

يخفف كثيرا من الغرابة الكامنة في القانون الرياضي ، لان الآلية الاساسية تصبح عندئذ اكثر بساطة من حساب مقلوب مربع المسافة . يمكن ان يقال في هذه الالية ، صدمات الجسيمات ، أنها تقوم بالحساب من تلقاء نفسها .

العيب الوحيد في هذه الفكرة انها لاتتماشى مع وقائع اخرى . والمزعج انكم ، في كل مناسبة تخترعون فيها نظرية ما ، يجب عليكم أن تحللوا جميع نتائجها الممكنة لمعرفة فيما اذا كانت تتنبأ بشيء آخر ونظرية الجسيمات تتنبأ بشيء آخر . بما أن الارض تتحرك فان عدد الجسيمات التي تضربها من امامها يفوق تلك التي تلحق بها من خلفها. (عندما تركضون تحت المطر فان وجهكم يستقبل من القطرات عددا اكبر من تلك التي تسقط على نقرتكم) . فالارض ، في حركتها ، تذهب للقاء الجسيمات الاتية من أمامها وتهرب من الجسيمات الاتية من خلفها . فهي اذن تصاب من أمامها أكثر مما تصاب في ظهرها ، ممايتسبب في نشوء قوة تقاوم حركتها(١) . وهذه القوة من شأنها أن تبطىء حركة الارض على مدارها ، ولاتتيح لها الاستمرار في دورانها حول الشمس منذ ثلاثة أو اربعة مليارات سنة (على الاقل) وحتى الان . انها نهاية النظرية ! وسيقول كل منكم : « لكنها كانت جميلة ، وقد أراحتني من الرياضيات لفترة ، وانا قد اخترع نظرية احسن منها . » ربما تستطيعون ذلك ، وما من انسان يعلم حتى الآن بواطن هذا الامر . ولكن ، منذ نيوتن حتى الآن ، لم يخترع انسان نظرية تشرح الآلية الرياضية لهذا القانون، الا كانت قولا قيل من قبل ، أو ادخالا لرياضيات اكثرا تعقيدا ، هذا اذا خلت من النبوءات التي لاتتحقق . فليس بين ايدينا اليوم نموذج لقانون الثقالة غير صيغته الرياضية .

ولو لم يكن لدينا سوى قوانين من هذا النوع لهان الامر . فنحن كلما توسعنا في الابحاث تكشفت لنا قوانين جديدة ، وكلما توغلنا في اعماق

---

(١) وهذا يشبه ايضا حال الانسان في الهواء . فجسيمات الهواء ترد عليه وتصدمه من جميع الجهات ؛ وهو عندما يركض يذهب للقاء الجسيمات الاتية من امامه ويهرب من الجسيمات الاتية من ورائه ؛ وعندئذ يشعر تماما بان الهواء يقاوم حركته . (المترجم)

الطبيعة استفحلت الصعوبات . فكل قوانيننا هي نصوص رياضية ، ومن الصنف المعقد والمجرد . فقانون التثاقل ، بالشكل الذي اعطاه نيوتن ، لايحتاج الا لرياضيات بسيطة الى حد ما . لكن القوانين التي اتت بعدئذ كانت اكثر فأكثر تجريدا وبالتالي كانت الصعوبات تشتد كلما استمر التقدم . لماذا ؟ ليس عندي اية فكرة عن الجواب . لكن واجبي الوحيد هو أن اعترف لكم بهذا الواقع . والناحية المأساوية في محاضرتي هذه هي بالذات اضطراري لان اجعلكم تدركون ان من غير الممكن أن نفسر بشكل جدي جمال قوانين الطبيعة ، وخصوصا ان افعل ذلك لاناس ليس عندهم اية معلومات عميقة في الرياضيات . انا آسف ، فالامر يبدو هكذا .

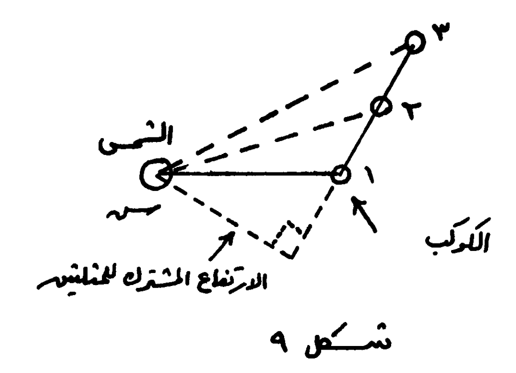
ربما تقولون : « حسنا . لقد قبلنا انه لايوجد تفسير لهذا القانون ، لكن قل لنا على الاقل ماذا **يكون** هذا القانون . ولماذا لاتقوله لنا بالكلمات بدلا من الرموز ؟ فليست الرياضيات سوى لغة ، ونحن نحب أن نتمكن من ترجمة هذه اللغة » . الواقع انني ، بشيء من الصبر ، استطيع ذلك ، واظن انني قد فعلت شيئا من هذا القبيل . وبامكاني ان افعل اكثر بقليل فاشرح بتفصيل اكثر ، كيف تدل المعادلة ان القوة تضعف الى ربع قيمتها حينما تزداد المسافة الى ضعفي قيمتها ، وهكذا دواليك. بامكاني أيضا أن اترجم جميع الرموز الى كلمات ، كي أكون لطيفا مع الناس الخاليي الذهن الجالسين امامي وكلهم امل ان يفهموا هذه الاشياء. فبعض الناس مشهورون بقدرتهم على أن يشرحوا ، لخالي الذهن وبلغة بسيطة ، اشياء معقدة . وبعدئذ يذهب خالي الذهن هذا ينقب في كتاب بعد كتاب عله يتجنب التعقيدات . لكن التعقيدات لاتلبث أن تمسك به ، ولو استعان بأبلغ المبسطين . لانه سيصادف ، اثناء قراءته وفي وقت ما ، غموضا لايلبث أن يستفحل امره عليه ، ونصوصا اشد فاشد تعقيدا ، وافكارا اكثر فأكثر استغلاقا على الفهم ولايرى بينها اية رابطة. وعندما يشعر بالضياع يتأمل في أن يجد في كتاب آخر شرحا افضل .. هذا المؤلف نجح تقريبا — ربما نجح آخر تماما !

لكني أعتقد ان هذا غير ممكن لان الرياضيات **ليست** في الواقع لغة

اخرى . ان الرياضيات لغة ومحاكمة ، أو قل منطق اضيف الى لغة . انها عمليا كل ما ينتج عن تفكير ومحاكمة دقيقة . ان الرياضيات تسمح بالربط بين نص وآخر . يمكن ان اقول لكم مثلا ان القوة تتجه نحو الشمس .. كما يمكن ان أقول لكم ، وقد قلت ، انني لو رسمت خطاً من الشمس الى الكوكب ثم خطاً آخر بعد فترة معينة ، ولتكن ثلاثة اسابيع ، فان الكوكب يتحرك بحيث تكون المساحة التي يمسحها هذا الخط اثناء هذه الاسابيع الثلاثة تساوي تماما المساحة الممسوحة اثناء الاسابيع الثلاثة التالية ، ثم الثلاثة التي تلي وهكذا دواليك طالما بقي الكوكب يدور حول الشمس . فباستطاعتي أن أشرح لكم بعناية هذين النصين لكنني لن استطيع ان اشرح لكم لماذا هما متكافئان .

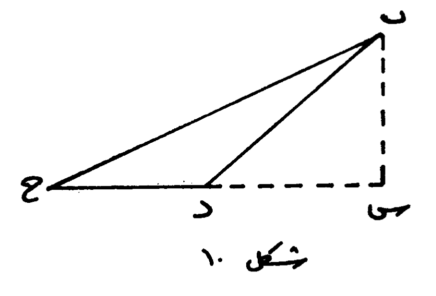
فالطبيعة ، بكل قواعدها هذه والقوانين الغريبة التي فصلتها لكم بعناية ، تبدو مليئة بالاشياء المعقدة . لكن هذه الاشياء ، في الواقع ، ذات صلات وثيقة فيما بينها . فاذا كنتم لاتستسيغون الرياضيات فلن تروا ، في هذا التنوع من الوقائع ، المنطق الذي يسمح لكم بالربط بين واقع وآخر .

قد يبدو غير قابل للتصديق ان أتمكن من البرهان على ان مساحات متساوية تنمسح اثناء فترات متساوية عندما تكون القوى متجهة نحو الشمس . وفي سبيل ذلك سأعمد ، اذا سمحتم ، الى اعطائكم برهانا على ان هاتين الفكرتين هما حقا متكافئتان ، وذلك لكي تتفهموا أشياء أكثر من مجرد نصي هذين القانونين . وهكذا سأثبت أن القانونين مترابطان وأن المحاكمة بحد ذاتها يمكن ان تقود من احدهما للاخر وأن الرياضيات ليست سوى محاكمة منظمة . وعندها يمكن أن تقدّروا جمال العلاقة بين النصين حق قدره . سأبرهن انه اذا كانت القوتان تتجهان نحو الشمس فان مساحات متساوية تنمسح في ازمنة متساوية .



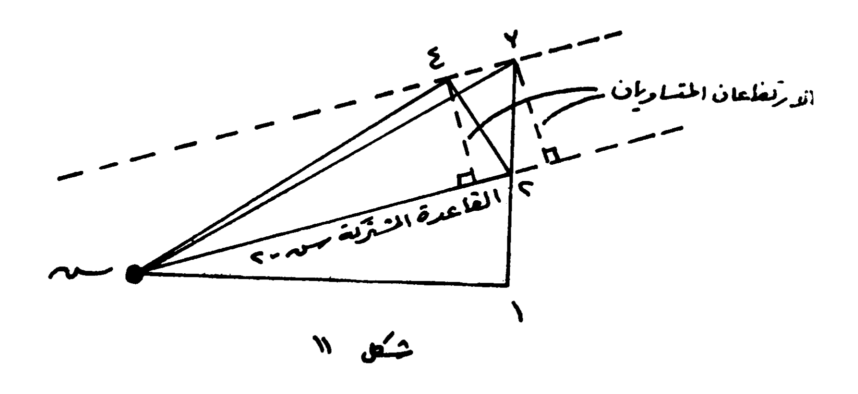
شكل ٩

لنتصور الشمس والكوكب (شكل ٩) ولنفترض ان الكوكب كان يحتل ، في لحظة ما ، المكان ١ وانه انتقل بحيث اصبح ، بعد ثانية زمنية، في المكان ٢ . فلو كانت الشمس لاتسلط أية قوة على الكوكب فانه،بموجب مبدأ العطالة لغاليله ، سيتابع طريقة في خط مستقيم . وعلى هذا الاساس كان سيقطع ، في الثانية الزمنية التالية ، مسافة مساوية تماما للمسافة السابقة وعلى المستقيم نفسه حتى يصل الى المكان ٣ . لنبرهن اذن، باديء ذي بدء واذا لم تتسلط قوة علىالكوكب ، أنمساحات متساوية تنمسح في أزمنة متساوية . تذكروا أن مساحة المثلث تساوي نصف جداء قاعدته بارتفاعه وأن الارتفاع هو العمود النازل من راس المثلث على القاعدة المقابلة له .



شكل ١٠

اذا كانت احدى زوايا المثلث منفرجة فان الارتفاع هو العمود **بس** النازل على القاعدة **حد** . لنقارن الآن بين مساحتي المثلثين المسوحين لوكانت الشمس لاتسلط على الكوكب أية قوة (شكل ٩) . تذكروا أن القطعتين ١ ـ ٢ و ٢ ـ٣ متساويتان. والآن ، هل المساحتان متساويتان؟ انظروا الى المثلث المؤلف من الشمس والنقطتين ١ و ٢ . ماهي مساحته؟ انها نصف جداء القاعدة ١ ـ ٢ بالارتفاع النازل من **ش** على خط القاعدة . وماذا بشأن المثلث الآخر الذي قاعدته الانتقال ٢ ـ ٣ ؟ ان مساحته هي نصف جداء القاعدة ٢ ـ ٣ بالعمود النازل من **ش** . وهذان المثلثان لهما ارتفاع واحد : وبما أن قاعدتيهما ، كما رأينا ، متساويتان فان مساحتيهما ، بالنتيجة ، متساويتان . كل شيء يسير ، حتى هنا ، على مايرام : لو كانت الشمس لاتسلط على الكوكب أية قوة فان مساحات متساوية تنمسح في ازمنة متساوية . لكن الشمس تسلط في الواقع قوة جذب . فهي خلال المجالين ١ ـ ٢ ـ ٣ تجذب الكوكب وتعدل حركته بالانعطاف في اتجاهها الخاص . ولمعالجة هذا الامر يمكن أن نعتبر ، بتقريب جيد ، أن الوضع الوسطي للكوكب ، بين **اللحظتين** ١ و ٣ ، هو الوضع ٢ و أن تأثير القوة أثناء الفاصل الزمني ٢ ـ ٣ يتلخص بتعديل الحركة ، بنسبة ما ، في الاتجاه ٢ ـ **ش** (شكل ١١) .



شكل ١١

هذا يعني ، بالرغم من ان الكوكب ينتقل وفق المستقيم ١ ــ ٢ وانه، في حالة عدم وجود القوة ، كان سيتابع طريقة بنفس الاتجاه اثناء الثانية الزمنية التالية ، فان تأثير الشمس يعدل حركته بأن يضيف مركبة تجذب الكوكب في الاتجاه ٢ ــ ش . فأثناء الثانية الزمنية التالية تكون الحركة الحقيقية وسطا بين مايريد الكوكب أن يفعل بنفسه وما تريد الشمس أن تفعل به . وعندئذ ، بدلا من أن يذهب الكوكب نحو المكان ٣، يصل في النهاية الى المكان ٤ . يجب علي الان ان ابرهن لكم على ان مساحتي المثلثين ٢ ــ ٣ ــ ش و ٢ ــ ٤ ــ ش متساويتان . وهذا مؤكد ، لانهما كليهما محصوران بين مستقيمين متوازيين ، اذ أن بعد المكان ٤ عن المستقيم ش ــ ٢ يساوي بعد المكان ٣ عن المستقيم ش ــ ٢ (الممدد) . فمساحة المثلث ش ــ ٢ ــ ٤ تساوي اذن مساحة ش ــ ٢ ــ ٣ . لكنني برهنت منذ قليل على أن المثلثين ش ــ ١ ــ ٢ و ش ــ ١ ــ ٣ لهما مساحتان متساويتان ؛ وهذا اذن شأن ش ــ ١ ــ ٢ و ش ــ ٢ ــ ٤ . وهكذا نرى ، خلال حركة الكوكب الحقيقية ، أن المساحتين الممسوحتين خلال الثانيتين ، الاولى والثانية ، متساويتان .

وهكذا يتأكد لنا أن المحاكمة تسمح بادراك الارتباط بين واقع أن القوة متجهة نحو الشمس وواقع أن مساحات متساوية تنمسح في أزمنة متساوية . انها براعة كبيرة ، أليس كذلك ؟ الحق أنني أستقيت كل شيء من نيوتن، واتيت به مباشرة من كتابه «المبادىء» بما فيه الرسوم ، ولم أغير سوى الرموز لانه كتب باللاتينية واستعملت انا الارقام العربية.

ان نيوتن لم يستعمل في كتابه سوى براهين هندسية ، اما نحن اليوم فلا نحاكم بهذه الطريقة بل نقوم بمحاكمة تحليلية بالرموز . فالطريقة الهندسية تستلزم مهارة في رسم المثلثات وفي حساب المساحات. لكن الطرق التحليلية ، بعد أن طرأ عليها تحسينات عديدة ، اصبحت سريعة واكثر فعالية . وسأشرح لكم كيف نفعل ذلك بالرموز الرياضية حيث لايلزم ، للوصول الى النتيجة ، سوى كتابة مجموعة من الرموز

لنناقش اذن سرعة تغير المساحة ، ولنرمز لهذه المساحة بـ $\overleftarrow{\text{س}}$.
ان المساحة تتغير عندما يدور نصف القطر الشعاعي وسنرمز له بـ م
(لانه يمثل المسافة بين الشمس والكوكب) . وسنرمز بـ $\dot{\text{ن}}$ لسرعة
تغير المساحة و بـ $\overleftarrow{\dot{\text{م}}}$ لسرعة تغير المسافة الشعاعية. هذا وان السرعة
المساحية $\dot{\text{ن}}$ هي مركبة السرعة العمودية على نصف القطر مضروبة
بنصف القطر . وهذا مايكتب على الشكل .

$$\dot{\text{ن}} = \overleftarrow{\text{م}} \times \overleftarrow{\dot{\text{م}}}$$

ونتساءل الان اذا كان معدل تغير المساحة يتغير هو نفسه . المبدأ
يقول ان هذا المعدل لايجب ان يتغير . لنأخذ تفاضل هذه العلاقة ، وهذا
يعود الى وضع نقاط فوق الاحرف في الامكنة المناسبة بموجب طريقة
معينة ــ وهذا كل ما هنالك . وما عليكم سوى ان تتعلموا هذه الطرق ،
وهي مجموعة قواعد يرى الناس الرياضيون انها مفيدة جدا في الحسابات.
ونكتب :

$$\ddot{\text{ن}} = \overleftarrow{\dot{\text{م}}} \times \overleftarrow{\dot{\text{م}}} + \overleftarrow{\text{م}} \times \overleftarrow{\ddot{\text{م}}} = \overleftarrow{\text{م}} \times \frac{\overleftarrow{\text{ق}}}{\text{ك}}$$

فالحد الاول من الطرف الاوسط يقول بأخذ مركبة السرعة العمودية
على السرعة ذاتها ؛ وهذه المركبة معدومة : لان السرعة لها نفس منحاها!
اما التسارع ، وهو المشتق الثاني $\overleftarrow{\ddot{\text{م}}}$ للمسافة ، فهو يساوي القوة
مقسومة على الكتلة .
ان العلاقة السابقة تدل اذن على ان معدل تغير معدل تغير المساحة
(اي معدل تغير السرعة المساحية) يساوي مركبة القوة العمودية على
نصف القطر (مقسومة على الكتلة) . لكن اذا كانت القوة هي على
منحى نصف القطر ، كما هي الحال هنا ، نجد

$$\overleftarrow{\text{م}} \times \frac{\overleftarrow{\text{ق}}}{\text{ك}} = 0 \quad \text{أي} \quad \ddot{\text{ن}} = 0$$

وهكذا ، كما يقول نيوتن : بما انه لايوجد قوة عمودية على نصف القطر ، فان هذا يعني أن معدل تغير المساحة لايتغير . اننا لانتوخى من ايراد هذه الطريقة سوى أن نظهر فعالية الرموز في التحليل . ان نيوتن كان يعرف شيئا قليلا عن طريقة الحساب هذه وبرموز تختلف قليلا عن رموزنا ، لكنة كان يستعمل الطريقة الهندسية لانه كان يحاول جعل كتاباته أيسر فهما ؛ وهو الذي اخترع الحساب التفاضلي وهو اسم يطلق على مثل الطريقة التي اريتكم اياها .

ان هذا المثال يوضح بصورة جيدة العلاقة بين الرياضيات والفيزياء. ففي الفيزياء عندما تستعصي مسألة ما غالبا مانذهب الى الرياضيين علنا نجد انهم كانوا قد درسوا شيئا من هذا القبيل وفتحوا طريقا في المحاكمة يمكن ان نسلكه . لكننا قد نجد أنهم لم يدرسوه ، ولا مناص لنا عندئذ من اختراع طريقة خاصة بنا ، نقدمها بعدئذ الى الرياضيين. وكل محاكمة متماسكة توسع دائرة معارفنا في بعض جوانب التفكير ، وعندما نستخلص الزبدة نعطيها الى الرياضيين ، وعندئذ يضعونها في كتبهم كفرع من الرياضيات . فالرياضيات تعطي اذن وسيلة المرور من مجموعة نصوص الى اخرى ، وهذا وضوحا مفيد جدا في الفيزياء لان لدينا عدة اساليب للكلام عن الاشياء ، والرياضيات تسمح لنا باستخلاص النتائج وبتحليل المواقف . والواقع ان مجموع مايعرفــه الفيزيائـــي ضئيل جدا ، وما عليه سوى ان يتذكر القواعد التي تأخذ بيده من نقطة لاخرى وهذا يكفيه لان جميع تلك النصوص عن الازمنة المتساوية ، او القوة على منحى نصف القطر ، وما الى ذلك ، مرتبطة بعضا ببعض بروابط المحاكمة .

وهنا تبرز مسألة مهمة . هل يوجد فكرة يمكن ان نستنتج منها كل البنية ؟ هل يوجد في الطبيعة نظام أو بنية يسمحان لنا بأن نؤمــن بوجود مجموعة نصوص اكثر أساسية وأن بعضها اكثر ثانوية ؟ الواقع انه يمكن أن ننظر الى الرياضيات من زاويتين مختلفتين اسمي اولاهما ، في هذه المحاضرة ، المدرسة البابلية والثانية المدرسة اليونانية . ففي مدارس بابل كان الطالب يتعلم نقطة معينة بدراسة عدد كبير من الامثلة

حتى يدرك القاعدة العامة . وكان يعرف أيضا قسطا لابأس به من الهندسة وعدة خواص للدائرة ونظرية فيثاغورس ودساتير لحساب سطوح المكعبات والمثلثات ؛ وكان ، فوق ذلك ، يتمتع ببعض المنطق ليمر من احداها للاخرى . وكان يوجد جداول عددية تسمح له بحل معادلات معقدة . اي أن كل شيء كان معدا له كي يقوم بحساب واقعي. أما اقليدس فقد اكتشف أنه يمكن ان نستنتج ، بترتيب معين ، جميع نظريات الهندسة انطلاقا من مسلمات على درجة كبيرة من البداهة والبساطة . فالتقاليد البابلية – أو ما اسميها هكذا – تدعو الى معرفة جميع النظريات المختلفة وكثيرا من علاقاتها المتبادلة دون أي اكتراث بأنها كلها يمكن ان تخرج من بضعة مسلمات . وأكثر الرياضيات عصرية تركز على المسلمات والبراهين في اطار دقيق من الاتفاق على المسلمات كمسلمات اقليدس بعد ادخال بعض التحسينات عليها ، ثم تشرح كيف ينتج منها كل النظام . فلا تؤخذ مثلا فيها نظرية فيثاغورس (مجموع مربعي الضلعين القائمين في مثلث قائم يساوي مربع الوتر) كمسلمة . لكن هذه النظرية تتخذ كمسلمة من وجهة نظر أخرى ، وجهة نظر الهندسة الديكارتية .

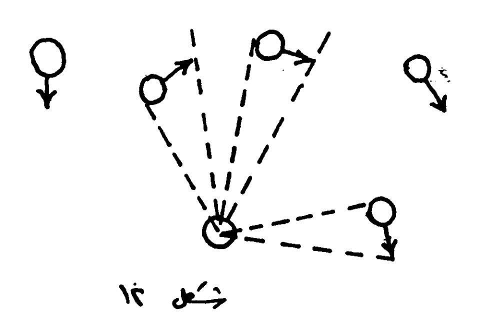
علينا اذن اولا ان نقبل ، حتى في الرياضيات ، امكانية الانطلاق من نقاط مختلفة . فاذا كانت المحاكمة تربط بين هذه النظريات جميعا فلا مجال عندئذ ، لدى اختيار المسلمات من بينها ، أن نفضل بعضها على بعض وان نعتبر « ان هذه المسلمات اساسية أكثر من تلك » ؛ فانتم لو أعطيتم تلك بدلا من هذه لاستطعتم الحصول على هذه بسلوك المحاكمة في الطريق المعاكس . فالوضع يشبه جسرا ذا دعامات كثيرة وقناطر عديدة ، اذا انهار بعضها أمكننا ، في كل الاحوال ، ان نأخذ طريقا أخرى لاعادة الاتصال . والاسلوب الرياضي الحالي ينطلق من بعض افكار خاصة ، تختار كمسلمات باتفاق ما . ثم ينشأ البناء على هذه الاساسات وان ما اسميته الاسلوب البابلي هو كما يلي : « الواقع انني اعرف هذا ، واعرف ايضا ذاك وذلك ، وأقوم بعملي انطلاقا من هنا . وغدا قد انسى ان هذا صحيح ، ولكني سأتذكر شيئا اخر وقد استطيع

عندئذ ان ابني كل شيء من جديد . ولن ادري تماما من اين يعقل ان ابدأ وأين يعقل ان انتهي . وسأتذكر فقط ما يكفي لكي استطيع ، في اي وقت وبالرغم من خيانة الذاكرة وضياع بعض الاشياء ، ان اعيد البناء كله . »

ان الانطلاق دوما من المسلمات ، في سبيل الحصول على نظريات ، ليس عملية فعالة جدا . فانتم لن تحصلوا على مردود جيد اذا رحتم، لحل كل مسألة هندسة ، تنطلقون من المسلمات الاولية . صحيح ان باستطاعتكم ان تذهبوا ، في الهندسة ، الى ابعد فأبعد حتى ولو لم تكونوا تملكون في البدء سوى الضروري الضروري . لكن من الاجدى جدا أن نعمل بطريقة اخرى ، لان تقرير اي المسلمات احسن ليس بالضرورة خير طريقة لتدبير الامور عند الحاجة . وفي الفيزياء على الاقل تلزمنا الطريقة البابلية ، لا الاقليدية اليونانية . واليكم اسباب ذلك .

ان المهم ، في الطريقة الاقليدية ، هو ان نجعل من المسلمات شيئا اكثر وزنا أو أهمية . لكن لنتساءل ، في حالة التثاقل مثلا ، اي المسلمتين أحسن ؟ هل هي أن نقول : ان القوة تتجه نحو الشمس أم أن نقول ان مساحات متساوية تنمسح في أزمنة متساوية ؟ وهل ان احدى الفكرتين اكثر اهمية أو أكثر اساسية من الاخرى ؟ فمن وجهة نظر معينة يكون نص القوة أحسن . اذ لو اعطيت القوى استطيع ان أعالج جملة ذات عدة جسيمات مداراتها لم تعد اهليلجية لان نص القوى يدل على تجاذبهما المتبادل . تصبح ، في هذه الحالة ، نظرية المساحات غير صالحة ، مما يجعلني اميل الى الاعتقاد بان نظرية القوى هي التي يجب ان تؤخذ كمسلمة . ولكن ، من جهة اخرى ومن اجل جملة ذات عدد كبير من الجسيمات ، يمكن لمبدأ المساحات المتساوية ان يتعمم كنظرية اخرى ؛ بيد ان نصها معقد وليس فيه من الجمال ما في النص الاصلي ، لكنها على كل حال ابنته الطبيعية . خذوا جملة ذات جسيمات عديدة ولتكن ، مثلا ، المشتري وزحل والشمس وعدة نجوم أخرى تتجاذب بعضا الى بعض وانظروا اليها من بعيد ، اي من

حيث ترون منظرا اسقاطيا (شكل ١٢) . سترون ان الجسيمات تتنقل في اتجاهات شتى . لنركز اهتمامنا على احد هذه الجسيمات ولنحسب



شكل ١٢

المساحة الممسوحة بنصف القطر الذاهب من هذا الجسيم الى كل واحد من الجسيمات الاخرى . لنعط ، في هذا الحساب ، للجسيمات اهمية متناسبة مع كتلتها: اذا كان جسيم اثقل بمرتين من جسيم اخر ، نحسب المساحة التي تخصه اكبر بمرتين ، وهكذا نضرب كل مساحة ممسوحة بعدد يتناسب مع كتلة الجسم الذي يمسحها . فاذا جمعنا عندئذ هذه المساحات كلها سنجد ان **المجموع الذي نحصل عليه لايتغير بمرور الزمن** . يسمى هذا المجموع العزم الحركي أو العزم الزاوي للجملة ويسمى هذا القانون انحفاظ العزم الزاوي ، وكلمة انحفاظ تعني ببساطة ان هذه الكمية لاتتغير .

ينتج من هذا القانون مايلي . لنتصور كومة نجوم تتهافت بعضا نحو بعض لتشكل سديما أو مجرة . ففي البدء تكون بعيدة جدا عن المركز في نهاية انصاف اقطار طويلة وتتحرك ببطء فتمسح مساحات صغيرة . وعندما تتقارب تتناقص ابعادها عن المركز حتى تصبح صغيرة جدا عندما تجاور المركز ، وعندها يجب عليها ان تتحرك بسرعة كبيرة لتمسح المساحات نفسها . وهكذا ترون ان النجوم كلما كانت قريبة من المركز كلما كان دورانها اسرع . وهكذا يتفسر وسطيا الشكل العام

للسدم الحلزونية . وبالمحاكمة ذاتها يمكن ان نفهم كيف يفعل المنزلق على الجليد عندما يدور حول نفسه . فهـو ينطلق وساقه منفرجـة ومفتوحة فيدور ببطء اول الامر ثم يقرب ساقة المنفرجة من الاخرى فيسرع في دورانه . فعندما تكون ساقه منفرجة تساهم في مسح مساحة مافي الثانية الزمنية وعندما يطويها يدور بسرعة أكبر كي تمسح نفس المساحة في نفس الزمن . انني لم أبرهن هذه النظرية على المنزلق : فهو يستخدم قوته العضلية وهي تختلف عن قوة التثاقل ومع ذلك فهي تصلح عند المنزلق أيضا .

وهكذا نجد قضية اخرى . فكثيرا ما نقع في أحد مجالات الفيزياء، كقانون التثاقل هنا ، على مبدأ تظهر صلاحيته في مجال اوسع جدا من ذلك المجال الذي برهنا فيه عليه . ان هذا لايحدث في الرياضيات ، فهناك لاتبرز النظريات في غير المجالات المقدر لها ان تصلح فيها . وبتعبير آخر، اذا قلنا ان قانون المساحات المتساوية هو مبدأ من الفيزياء في مجـال التثاقل استطعنا ان نستنتج منه انحفاظ العزم الزاوي ولكن في التثاقل فقط . ومع ذلك نكتشف تجريبيا ان انحفاظ العزم الزاوي هو شيء أعم بكثير . وقد وضع نيوتن مبادىء أخرى سمحت له بالحصول علـى القانون العام لانحفاظ العزم الزاوي . لكن مبادىء نيوتن هذه خاطئة . لا يوجد قوى ، كل ذلك هراء ، الجسيمات ليس لها مدارات ، وهكذا دواليك . ومع ذلك فان انحفاظ العزم الزاوي ، كما أتى من قانون المساحات المتساوية ، يبقى صحيحا . فهو ينطبق على الحركات الذرية في ميكانيك الكم ومايزال ، حتى اشعار آخـر ، صحيحـا حتى اليوم . وهكذا يوجد مبادىء عليا تسيطر على جميع القوانين ، واذا ربطنـا انفسنا ببراهين هذه القوانين اكثر من اللازم ، كأن نعتبر ان هذا القانون لايصح الا عندما يصح ذاك ، لانتمكن عندئذ من فهم العلاقات فيما بـين مختلف فروع الفيزياء . وقد نستطيع يوما ، اذا اكتملت الفيزياء وعرفنا جميع قوانينها ، أن ننطلق من بضع مسلمات ، وسيوجد حتما من يحسن اختيارها لكي نتمكن من استنتاج كل الباقي منها . ولكن ، بما اننا لانعرف جميع القوانين ، نستطيع ان نستغل بعضها كي نحزر نظريات

تتجاوز صلاحيتها حدود برهانها . فمن يريد أن يفهم الفيزياء عليه ان يحتفظ في راسه ، وبرسوخ جيد ، بجميع قوانينها المختلفة وبالعلاقات المتبادلة فيما بينها ؛ لان القوانين غالبا ماتتسع الى ابعد من المناطق التي ظهرت فيها . ولن تزول اهمية ذلك الا حين تكتشف جميع القوانين.

وجانب آخر مثير ، وغريب جدا ، في العلاقة بين الرياضيات والفيزياء ، يتجلى في القدرة على البرهان ، بواسطة حجج رياضية ، على امكانية الانطلاق من نقاط تبدو مختلفة والحصول مع ذلك على نتيجة واحدة . وهذا واضح : فأنتم اذا كان لديكم عدة مسلمات كان بامكانكم أن تستبدلوا ببعضها نظريات . لكن الواقع أن كل قانون فيزيائي له بنية حساسة جدا ، بمعنى أن مختلف نصوصه ، رغم تكافئها ، ذات طبائع تختلف كيفيا فيما بينها ، وهذا ما يزيد في قيمتها . ولتوضيح هذه الفكرة سأعمد الى ثلاثة نصوص لقانون التثاقل ، متكافئة تماما كلها ، وسأريكم كيف تختلف كلها فيما بينها .

النص الاول يؤكد وجود قوى متبادلة بين الاجسام وذلك بموجب المعادلة التي ذكرتها لكم آنفا :

$$\text{ق} = \text{ث} \frac{\text{ك} \times \text{كَ}}{\text{م}^2}$$

كل جسم واقع تحت تأثير قوة يتسارع ، أي يغير حركته بكمية ما في الثانية الزمنية . ذلك هو النص العادي للقانون وسأسميه قانون نيوتن . ان هذا القانون يقول بأن القوة تتعلق بشيء موجود على مسافة من هنا . ان لهذا القانون اذن ما نسميه طبيعة لا موضعية ، بمعنى أن الفعل (القوة) المؤثر في جسم ما يتوقف ، لا على موضع الجسم المنفعل نفسه ، ولكن على موضع جسم آخر يقع على بعد ما .

قد لاتحبون فكرة الفعل عن بعد وتقولون :« كيف يمكن لهذا الجسم هنا أن يعلم ما يجري هناك ؟ » اليكم عندئذ بديلا ، نصا ثانيا غريبا هو

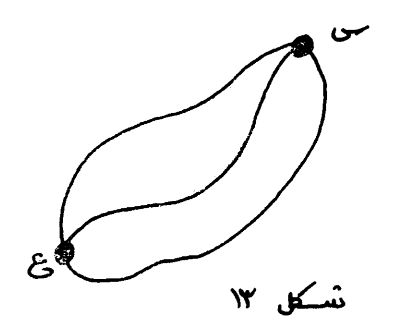
الآخر ، لهذا القانون . انه نص « الحقل » . وسأشرحه لكم بالتقريب رغم صعوبـة ذلك . انه نص مختلف كليـا عن النص السابق . ففيه نعلق ، بكل نقطة من الفراغ ، عددا (نعم ، ذلك هو المزعج في الفيزياء ، عليها أن تكون رياضية) ؛ وهذا العدد متغير من نقطـة لاخرى . فاذا وضعتم جسما في نقطة ما ، فانه سيخضع الى قوة تتجه نحو المنطقة التي يتغير فيها هذا العدد تغيرا أعظميا . اعطي لهذا العدد اسمه الشائع، الكمون : فالقوة تتجه اذن في اتجاه التغير الاعظمي للكمون . والقوة ، فوق ذلك ، متناسبة مع معدل تغير الكمون بين نقطة واخرى . ذلك هـو جزء من النص ، لكنه غير كاف ، اذ يجب أن أشرح لكم كيف أعين تغير الكمون . يمكن أن أقول انه يتغير كمقلوب المسافة عن كل نقطة ، لكنني عندئذ أكون قد عدت بكم الى فكرة الفعل عن بعد . يمكن أيضا اعطاء نص آخر لا تحتاجون فيه لمعرفة ما يجرى خارج منطقة كروية صغيرة تحيط بالنقطة التي فيهـا القوة . فاذا أردتم معرفة الكمون في مركز الكرية ما عليكم سوى أن تعطوني قيمته على سطحها مهما كانت صغيرة ؛ ولا حاجة بكم لان تهتموا بما يحدث خارجها ، بل أن تقولوا لي فقط ما يوجد في جوار المركز وما هي الكتلة التي تحويها الكرية . فقاعدة حساب الكمون هي عندئذ كما يلي : ان الكمون في المركز يساوي وسطي الكمون على السطح مطروحا منه الثابت ث (الوارد في المعادلة نفسها) ومقسوما على ضعفي نصف قطر الكرية ثم مضروبا بالكتلة الموجودة داخل الكرية اذا كان حجمها صغيرا بصورة كافية ، أي :

$$\text{الكمون في مركز الكرية} = \text{متوسط الكمون على سطحها} - \frac{\text{ث} \times (\text{الكتلة الداخلية})}{2 \times (\text{نصف قطر الكرية})}$$

وهنا ترون مبلغ فرق هذا النص عن سابقه . فهذا يدلني على ما يجري في نقطة ما تبعا لما يجري في جوارها المباشر ؛ بينما يدل قانون نيوتن ذلك على ما يجري في لحظة ما تبعا لما جرى في لحظة سابقة جدا ؛ فهو يقول كيف يجب أن نعمل لحظة بعد لحظة ، بينما يدل النص الحالي كيف نقفز في المكان نقطة بعد نقطة . فالنص الثاني هو اذن موضعي وزمني

في آن معا لانه لايستند الا الى مايجري في الجوار المباشر . لكن النصين متكافئان تماما من وجهة النظر الرياضية .

يوجد أيضا نص ثالث للقانون يختلف تماما عن سابقيه ، ويتميز عنهما بالفلسفة والافكار الكيفية التي تنبع منه . وقد شرحت ، لمن لا يحب الفعل عن بعد ، كيف يمكنه أن يستغني عنه . وسأدلكم الآن على نص يقع ، فلسفيا ، في الطرف النقيض الآخر . ففيه لا نناقش ، بالمرة ، كيفية « الانتشار » نقطة بعد نقطة ولحظة بعد لحظة ، بل نجمع كل هذه الامور في نص عام ، كما يلي . اذا كنتم ازاء عدد من الجسيمات وأردتم ان تعرفوا كيف يتنقل أحدها من نقطة لاخرى ، فان النص الثالث يدعوكم ان تتخيلوا انتقالا ممكنا يذهب بالجسيم من النقطة الاولى الى النقطة الثانية خلال زمن ما (شكل ١٣) . لنقل أن الجسيم يريد الذهاب من س الى ع خلال ساعة واحدة ، وأنكم تريدون معرفة الطريق الذي



شكل ١٣

يسلكه . عليكم عندئذ أن تتصوروا عدة منحنيات تذهب كلها من س الى ع وأن تحسبوا ، من أجل كل منحن ، كمية ما (لا أريد أن أقول ما هي هذه الكمية ، ولكنني أقول لمن يعرف هذه الكلمات ، أن هذه الكمية هي الفرق بين الطاقة الحركية والطاقة الكامنة) . فاذا حسبتم هذه الكمية من أجل طريق ما ، ثم من أجل طريق آخر ، فستحصلون ، من أجل كل طريق ، على عدد مختلف . ولا بد ، وضوحا ، من وجود عدد

هو أصغرها جميعا . ان الطريق الذي يتعلق بهذا العدد الاصغري هو الذي يسلكه الجسيم فعــلا . وبهذه الصورة نكون قد وصفنا الحركة الفعليــة ، الاهليلج مثلا ، بنص يتناول المنحني بكليته . وبهذا النص تختفي فكرة السببية التي بموجبها يتحسس الجسيم بالقوة ويتحرك تحت تأثيرها ؛ فهو ، بدلا من هذا ، يهيمن على جميع الطرق ويتحرى كل الامكانيات كي يقرر أي طريق يسلك ويختار الطريق الذي يجعل تلك الكمية أصغرية .

وهكذا نكون قد ضربنا مثلا على كثرة النصوص ، الانيقة كلها ، التي نستطيع بها أن نصف سلوك الطبيعة الفعلي . فمن كان يؤمن بأن الطبيعة يجب أن تطيع مبدأ السببية فليستعمل قانون نيوتن ، ومن آمن باتصافها بمبدأ الاصغرية كان له ما يريد ؛ أما من يتمسك بفكرة وجود حقــل موضعي فله أن يطمئن . ولنا ، لو أردنا ، أن نتساءل أيها ، للطبيعة ، أحسن وصفا . الواقع أن هذه الامكانيات كلها ، لو لم تكن متكافئة تماما ولو كانت تؤدي الى نتائج متباينة ، لكفى أن نقوم بتجارب لنعرف كيف تختار الطبيعة سلوكها فعلا . فهناك من يورد حججا فلسفية تؤيد وجهة النظر هذه أو تلك . لكن التجارب العديدة علمتنا أنه لا يمكن الركون الى أي حدس فلسفي ازاء سلوك الطبيعة . بل يجب أن نتحرى ونجرب جميع الامكانيات . لكن جميع هذه النظريات ما تزال ، في الوقت الحاضر ، على كونها متكافئة تماما . هذا ، وان تلك الصياغات الثلاث (قانون نيوتن ، طريقة الحقل الموضعي ، مبدأ الاصغرية) تقود ، من وجهة النظر الرياضية ، الى نتائج متطابقة تماما . ما العمل اذن ؟ ستقرأون في كل الكتب أن ليس بالامكان أن نقوم باختيار علمي بين هذه الطرائق. صحيح أنها متكافئة علميا ولكن يستحيل أن نقول كلمة الفصل لاختيار افضلها. لانه لا يوجــد عندنا أية وسيلة حاسمة للتمييز بــين نظريات تتطابق نتائجها . على أن بينها ، من وجهة النظر النفسانية ، فروقا كبيرة ، وذلك لسببين . أولهما أن المرء قد يحبها فلسفيا أو لا يحبها ، والعادة هي عندئذ العلاج الوحيد ضد هذا المرض . ثم انها ، ثانيا وخصوصا ، تتمايز نفسانيا لانها لاتتكافأ عندما نحــاول أن نكتشف قوانين جديــدة .

وطالما بقيت الفيزياء غير كاملة وحاولنا ان نفهم القوانين المجهولة فان مختلف صيغاتها الممكنة يمكن أن توحي بما يجري في ظروف اخرى. وعندها لا تكون هذه الصيغ متكافئة نفسانيا لانها توحي لنا بآراء مختلفة عندما نريد ايجاد نص للقوانين في ظروف اعم . فآينشتاين مثلا ادرك أن الاشارات الكهربائية لايمكن ان تنتشر بأسرع من النور ، ثم حزر أن ما ادركه هو مبدأ عام . (انه الحدس التخميني الذي استعملناه في العزم الزاوي ، حيث به عممنا مبدأ الانحفاظ على غير الحالة التي اثبتناه فيها) . واعتقد انه صحيح من اجل كل شيء وبالتالي من اجل التثاقل. فاذا لم يمكن للاشارات أن تنتشر بأسرع من النور فان القول بالفعل الآني للقوى عن بعد هو راي خاطىء جدا . وهكذا ففي نظرية التثاقل العامة لآينشتاين يبدو راي نيوتن في وصف الفيزياء خاطئا بشكل مأساوي ومعقدا بشكل رهيب ، بينما تبقى طريقة الحقل الموضعي واضحة وصحيحة ، وكذلك مبدأ الاصغرية . لكننا لم نستطع بعد أن نرى بينهما راي الفصل .

والواقع انهما ، كليهما ليستا صحيحتين في ميكانيك الكم على الشكل الذي أوردناهما فيه . لكن وجود مبدأ الاصغرية ليس سوى نتيجة لميكانيك الكم تخضع اليها جميع الجسيمات في السلم المجهري (اي مجال الصغائر جدا) . والقانون الذي نفهمه اليوم ، أحسن فهم ، يجمع بين نظريتين تستخدمان مبدأ الاصغرية والقوانين الموضعية . فنحن نعتقد اليوم أن قوانين الفيزياء ذات طابع موضعي وتخضع الى مبدأ الاصغرية ولكننا لسنا متأكدين . لو كنتم ازاء بنية ليست صحيحة الا بشكل تقريبي ، وتشكون أن صدعا قد يحدث فيها ، فانه ، اذا كنتم قد بنيتموها على اسس من المسلمات احسنتم اختيارها ، لن يوجد على الاغلب بينها سوى مسلمة واحدة خاطئة وتبقى الاخريات صحيحات ، وعندها لن تحتاجوا الا لتعديل طفيف .

لكنكم اذا اسستم هذه البنية على مجموعة أخرى من المسلمات فقد يحدث أن تنهار كلها اذا كانت تستند الى العنصر الذي تصدع . فنحن

لا نعرف سلفا ، دون شيء من الحدس ، ما هي أحسن طريقة لوصف هذه البنية كي نتمكن من تدبر الامر في الظرف الجديد . فعلينا اذن ان نتذكر دوما جميع الآراء التي يمكن أن نعالج بها امرا ما . ذلك هو السبب الذي من أجله يتعلم الفيزيائيون الرياضيات في المدرسة البابلية ولا يعلقون سوى أهمية قليلة على المحاكمات الصارمة المنطلقة من مسلمات ثابتة .

ذلك هو أحد الجوانب المذهلة للطبيعة والذي يتجلى في كثرة الاساليب التي يمكن أن نفسر بها سلوكها . وهذه الامكانية ناتجة ، حصرا ، عن كون هذه القوانين كما هي بالضبط وبالتمام . فنحن ، مثلا ، لم نحصل على الصيغة الموضعية الا لان لدينا قانون مقلوب المربع ؛ فلو كان لدينا مقلوب المكعب لما أمكن ذلك . وفي الطرف الآخر من المعادلة ، حصلنا على مبدأ الاصغرية لان القوة مرتبطة بمعدل تغير السرعة ؛ فلو كانت القوة ، مثلا ، متناسبة مع معدل تغير الموضع ، لا السرعة ، لما توصلنا الى ذلك . ولو غيرتم القوانين كثيرا لتأكد لكم انكم لا تستطيعون أن تعطوا سوى صيغ أقل عددا . لقد كنت دوما اجد عجيبا ان القوانين الحقيقية للفيزياء يمكن ان تصاغ بأشكال عديدة ، ولا ادري سبب ذلك. يبدو أنها قادرة على التكيف في عدة قوالب معا .

أود الآن أن ابدي بضع ملاحظات اكثر عمومية حول علاقة الرياضيات بالفيزياء . ان الرياضيين لا يشغلون انفسهم الا ببنية المحاكمات ولا يهتمون فعلا بالشيء الذي يتكلمون عنه . حتى انهم لا يحتاجون **لمعرفة** عم يتكلمون أو ، كما يقولون هم انفسهم ، لا يهمهم صلاح أو عدم صلاح ما يفعلون . وسأشرح ذلك . انهم يبدأون باصدار المسلمات ، هذا مثل هذا ، ذاك مثل ذاك . ثم يأتي المنطق فيقوم بعمله دون علم بمعنى كلمتي : هذا وذاك . فاذا كانت المسلمات منصوصا عنها بالتمام والعناية الكافيين فان من يقوم بالمحاكمة لا يحتاج لمعرفة معاني الكلمات كي يستخلص منها النتائج باللغة ذاتها . فاذا استعملت كلمة مثلث في احدى المسلمات ، فسينتج نص حول المثلثات بالرغم من أن الذي أجرى المحاكمة يمكنه ان يجهل ما هو المثلث . وبامكاني أن أكرر محاكمته منذ البداية ، فأقول :

« المثلث ؟ انه ليس سوى شيء ذي ثلاثة أضلاع ، وهو كذا وكذا » وأفهم بعدئذ نتائجه النهائية . وبتعبير آخر ، يهيىء الرياضيون محاكمات مجردة جاهزة للاستخدام عندما يكون عندكم مجموعة مسلمات في العالم الواقعي. لكن الفيزيائي يعطي معنى لكل جملة في كلامه . وهذا شيء هام جدا لان كثيرا من الناس الذين يأتون الى الفيزياء من الرياضيات لا يدركونه . فالفيزياء ليست الرياضيات والرياضيات ليست الفيزياء . ان احداهما تساعد الاخرى . لكن ، في الفيزياء ، يجب أن تفهموا الارتباط بين الكلمات وعالم الواقع . فعندما تحصلون على نتيجة ما ، عليكم أن تترجموها ، في النهاية ، الى لغة الواقع ، لغة أجهزة من النحاس والزجاج ستستعملونها لاجراء التجارب . وبهذه الصورة فقط يمكن أن تتحققوا من نتائجكم . وهذا ليس من الرياضيات في شيء .

لكن من الحق أن نقول ان المحاكمات الرياضية، المستعملة في الفيزياء، ذات فعالية وفائدة كبيرتين . ومحاكمات الفيزياء هي أيضا مفيدة للرياضيين أحيانا .

ان الرياضيين يحبون أن يجعلوا محاكماتهم واسعة الشمول بقدر الامكان . فعندما أقول لهم : « أريد مناقشة الفراغ العادي ، ذي الابعاد الثلاثة » ، يجيبونني : « خذ نظرياتنا في الفراغ الذي عدد أبعاده **ن** . — لكنني لا أريد سوى حالة الابعاد الثلاثة . — حسنا ، اجعل **ن** = ٣ ! ». والواقع عندئذ أن كثيرا من نظرياتهم المعقدة تغدوا أبسط بكثير عندما نطبقها على حالات خاصة ؛ والفيزيائي يهتم دائما بالحالات الخاصة ، لا بالحالات العامة . فهو يتكلم عن شيء معين ، ولا يتكلم عن مجرد شيء لا على التعيين . يريد أن يناقش قانون التثاقل في عالم الابعاد الثلاثة ، لا حالة القوة اعتباطا في فراغ ذي **ن** بعدا . هناك اذن وبالضرورة عملية اختزال لان الرياضيين قد مهدوا الطريق من أجل صنف من المسائل ؛ وهذا مفيد جدا ، لكن الفيزيائي المسكين يرجع ، في الواقع ، دوما خطوة الى الوراء ويقول : « اعذروني ، لكنكم أردتم أن تحدثوني عن الابعاد الاربعة ... » .

عندما تعرفون عم تتكلمون ، وعندما تعلمون أن بعض الرموز تمثـل قوى ، وأن بعضها الآخر يمثل كتلا ، وعطالة ، و . . . الخ ، عندها يمكنكم أن تستخدموا احساسكم الاولي وخبرتكم الحالية في الامور . فأنتم قد اكتسبتم خبرة لا بأس بها وتعلمون على وجه التقريب ما سيحدث . لكن الرياضي المسكين يترجم كل شيء الى معادلات ؛ ولما لم يكن للرموز عنده أي معنى فانه لا يهتدي الا بالصرامة الرياضية والعناية في المحاكمات . أما الفيزيائي ، وهو يعرف على وجه التقريب الجواب المنشود ، فيمكنه بشكل ما أن يحزر جزءا من الطريق وان يتقدم ، بالتالـي ، بشيء مـن السرعة . فالصرامة الرياضية ، مهما كان كمالها ، ليست مفيدة جدا في الفيزياء . لكن هذا ليس سببا لانتقاد الرياضيين . اذ ليس سببا كافيا أن يكون شيء مفيدا في الفيزياء لكي نفرضه كما هو على الرياضيين . فهم يقومون بعملهم الخاص . واذا كنتم تريدون شيئا آخر فعليكم أن تجدوه بأنفسكم .

وفي الختام ينطرح السؤال التالي : هل يجب علينا ، عندما نريد أن نحزر قانونا جديدا ، أن نستخدم احساسنا الاولي وميولنا الفلسفية مثل « أنا لا أحب مبادىء الاصغرية » أو « أنا أحب مبادىء الاصغرية » أو « لا أحب الفعل عن بعد » أو « أحب الفعل عن بعد » ؟ وما هو مدى فائدة الاستعانة بالنماذج ؟ ان النماذج غالبا ما تكون ذات فائدة كبيرة وان غالبية أساتذة الفيزياء يحاولون أن يعلموا كيف يتم استعمال النماذج وكيف نكتسب حسا فيزيائيا بمـا يمكن أن تسير وفقه الامور . لكن الاكتشافات الكبرى تخرج في النهاية عن نطاق النموذج ولا يعود النموذج ذا فائدة . فقد اكتشف مكسويل مثلا الالكتروديناميك (أي التحريك الكهربائي أو الكهرطيسية) باستخدام العديد من الدواليب والمسننات الخيالية التي تملأ الفراغ . ولكن عندما نتخلص من كل هذه المسننات وسائر التركيبات في الفراغ فان الامور تسير بالشكل الجيد نفسه . كما أن ديراك[1] اكتشف القوانين المضبوطة لميكانيك الكم النسبوي بمجرد

(1) بول ديراك فيزيائي انكليزي حاز على جائزة نوبل عام ١٩٣٣ بالاشتراك مع ارفين شرود نجر .

ان حزر المعادلة . ويبدو أن هذه الطريقة ، تخمين المعادلة ، ذات فعالية كبيرة عندما يراد البحث عن قوانين جديدة . وهـذا ما يوضح ، مرة اخرى ، أن الرياضيات تعطي وصفا عميقا للطبيعة ، بينما بقيت ، دون فعالية كبيرة ، جميع محاولات وصفها بواسطة الميول الفلسفية أو الحس البدهي الآلي .

على أن الشيء الذي ما زال يحيرني هو أن الآلة الحاسبة ، التي تعمل وفق القوانين التي نعرفها اليوم ، تحتاج الى اجراء عدد هائل من العمليات المنطقية كي تكتشف ما يجري في منطقة من الفراغ مهما صغرت خلال فترة من الزمن مهما قصرت . فكيف يمكن أن يحدث كل ما يحدث في هذا الحيز المحدود ؟ ولماذا يلزم هذه الكمية الهائلة من المنطق لتعيين ما سيجري في منطقة ، من المكان ــ الزمان ، صغيرة جدا ؟ ولهذا السبب فانني كنت دوما اعتقد أن الفيزياء لا تتطلب ، في نهاية الامر ، نصوصا رياضية ؛ اي انه لا شك آت ، في النهاية ، ذلك اليوم الذي نكتشف فيه الآلية الكبرى فتغدو القوانين ذات بساطة كبيرة ، كرقعة الشطرنج رغم تعقيدها الظاهري . لكن هذه تأملات لا تختلف عن تأملات الآخرين ــ « أحب هذا » ، « لا أحبه » ــ ويجب أن لا نستبق الحوادث حول هذه القضايا .

ولا ختصار القول استعير كلمـات جينز حيث يقول : « يبدو أن المهندس الاكبر رياضي » . فالذين لا يفقهون شيئا في الرياضيات يصعب أن ننقل اليهم الشعور بجمال الطبيعة ، بأعمق ما فيها من جمال . لقد تكلم ك. ب. سنو عن الثقافتين . وأنا أعتقد حقا أن هاتين الثقافتين تفصلان الناس الذين عندهم عن الناس الذين ليس عندهم فهم للرياضيات كاف لان يجعلهم يجتلون جمال الطبيعة مرة واحدة على الاقل .

ان من المؤسف وجوب الرياضيات في هـذا الامر وأن الرياضيات صعبة لبعض الناس . يروى على ذمة الراوي أن ملكا ، بعد أن طلب من

اقليدس ان يعلمه الهندسة ، تذمر من صعوبتها . فأجابه اقليدس : « لا يوجد طريقة ملكية » . وهكذا الفيزيائيون لا يمكنهم أن يتحولوا عن لغة الطبيعة . فاذا أردتم ان تتعلموا كيف تتعرفون على الطبيعة وتتذوقونها فعليكم أن تفهموا لغتها . فهي لا تتجلى الا بهذا الاسلوب ، ونحن لسنا من الغرور على درجة تسمح لنا بأن نطلب منها أن تغير نفسها قبل ان نتنازل ونهتم بها .

وما من طريقـة ، مهما علت ثقافتنا ، تسمح لنـا بأن ننقل الـى الاصم مانشعر به لدى الاصفاء الى الموسيقى . وكذلك الامـر عندمـا نحاول أن ننقل لاناس « الثقافة الأخرى » فهمنا للطبيعة . وللفلاسفة ، اذا شاءوا ، أن يعطوكم افكارا كيفية عن الطبيعة . اما انا فأحاول ان افصلها لكم . لكن هذا مستحيل . ربما لان أفق الفلاسفة محدود كما كان محدودا أفق من يتصور أن الانسان هو مركز العالم .

٣

مبادئ الانحفاظ الكبرى

عندما ندرس قوانين الفيزياء نكتشف منها عددا كبيرا معقدة ومفصلة: قوانين التثاقل والكهرباء والمغنطيسية والتفاعلات النووية ... الخ . لكن ، من خلال هذا التنوع في القوانين الخاصة ، تسود مبادىء كبرى عامة تبدو هذه القوانين كلها خاضعة لها : انها ، مثلا ، قوانين الانحفاظ وبعض الخواص التناظرية والشكل العام لمبادىء الميكانيك ، وبكل أسف أو لحسن الحظ كما رأينا ، واقع انها كلها رياضية .

وفي هذه المحاضرة سأتحدث اليكم عن مبادىء الانحفاظ .

ان الفيزيائي يستخدم الكلمات الدارجة في معان خاصة . فكلمتا قانون انحفاظ تعنيان عنده وجود عدد يمكن حسابه في لحظة معينة ثم ، وبالرغم من أن الطبيعة تخضع الى تغيرات عديدة ، اذا حسبنا هذه الكمية في لحظة لاحقة سنجد انها تبقى دوما على قيمتها ، أي أن ذلك العدد لم يتغير .

لنأخذ ، مثلا ، انحفاظ الطاقة ؛ انها كمية يمكن حسابها وفق قاعدة معينة ونحصل لها دوما على نفس العدد مهما حصل .

انكم تدركون منذ الان ان هذا الامر يمكن أن يكون مفيدا . تصوروا أن الفيزياء ، او بالاحرى الطبيعة ، هي رقعة شطرنج واسعة فيها ملايين القطع وأننا نحاول ان نكتشف قواعد اللعبة . فالآلهة التي تلعب هذه

اللعبة انما تفعل ذلك بسرعة كبيرة لانستطيع معها اتباعها ولافهمها . على اننا ، مع ذلك ، نتوصل الى ادراك بعض القواعد ومن بين تلك التي نكتشفها اشياء لا تستدعي رصد كل النقلات .

لنفرض ، مثلا ، انه يوجد فيل واحد على الرقعة ، هو الفيل الابيض ؛ بما ان الفيل يتنقل قطريا ويبقى اذن على بيوت من لون واحد فاننا اذا صرفنا النظر لحظة عن الرقعة بينما تستمر الآلهة في اللعب ثم عدنا الى المراقبة فاننا سنتوقع من جديدوجود فيل ابيض على الرقعة: قد يتغير مكان هذا الفيل لكن لون بيته يبقى كما كان . تلك بالذات هي روح قانون الانحفاظ . ونحن لاحاجة بنا لممارسة اللعب كي نكتشف على الاقل بعض المبادىء .

صحيح أن هذا القانون الخاص ، في الشطرنج ، ليس صالحا تماما بصورة اجبارية . فقد نصرف النظر عن اللعب لفترة طويلة يكون خلالها الفيل الابيض قد اخرج من الرقعة وبلغ احد البيادق (الجنود) نهاية شوطه فرأى الاله اللاعب أن يستبدل به فيلا أسود . وهكذا قد تكون، مع الاسف ، بعض القوانين التي نفهمها اليوم ليست صحيحة بالضبط ، ولكنني شأشرحها لكم كما نراها في الوقت الحاضر .

لقد قلت لكم اننا نستعمل الكلمات الدارجة بمعان فنية اختصاصية. ففي عنوان هذه المحاضرة وردت كلمة « كبرى » في جملة « مبادىء الانحفاظ الكبرى » . وهذه الكلمة ليست مصطلحا فنيا : لقد أوردتها فقط لاعطي للعنوان رنينا مسرحيا ، وكان بامكاني ان أقول « قوانين الانحفاظ » . ولكن يوجد احيانا قوانين انحفاظ « لايمشي حالها » ، اي ان صحتها تقريبية فقط . لكنها مفيدة أحيانا ، فيمكن أن نسميها قوانين الانحفاظ « الصغرى » .

وسأذكر فيما بعد واحدا أو اثنين من هذه القوانين التي لايمشي حالها . لكن القوانين الكبرى التي سأتكلم عنها هي ، في الوقت الحاضر على الاقل ، صحيحة تماما .

ابدأ بأسهلها فهما وهو انحفاظ الشحنة الكهربائية . يوجد عدد ، الشحنة الكهربائية الكلية للعالم بأسره ، لايتغير مهما تغيرت الاحوال . فاذا فقدنا منه شيئا ، في منطقة ما ، سنجده حتما في منطقة اخرى . فالشيء الذي ينحفظ هو الشحنة الكهربائية بكليتها . كان فارادي[1] قد اكتشف ذلك تجريبيا . فقد جرب أن يضع نفسه داخل كرة معدنية كبيرة ، وكان في خارجها مقياس غلفاني دقيق جدا يسمح له بقياس شحنة الكرة ، لان اية شحنة صغيرة تحدث في الغلفاني أثرا محسوسا . وفي داخل الكرة وضع فارادي تجهيزات كهربائية متنوعة وعجيبة . ثم ولد شحنات كهربائية بدلك قضبان من الزجاج بجلد الهر وشغل ماكنات كهربائية ضخمة لدرجة أن داخل الكرة كان يشبه المختبرات التي ترونها في أفلام الرعب .

لكن أثناء كل هذه التجارب لم تظهر أية شحنة على السطح : لم يحدث اذن انتاج للشحنة . فلو كان قضيب الزجاج قد اكتسب شحنة موجبة بعد دلكه بجلد الهر فان هذا الجلد قد اكتسب بدوره شحنة سالبة مساوية تماما بحيث بقى المجموع الكلي للشحنتين معدوما ، فلو كانت شحنة قد تولدت داخل الكرة لظهر تأثيرها على الموجود خارجها. فالشحنة الكلية اذن قد انحفظت . وهذه الفكرة مفهومة بسهولة ، ويمكن تفسيرها بنموذج بسيط ليس فيه شيء من الرياضيات . لنفترض أن العالم مكون من نوعين فقط من الجسيمات : الالكترونات والبروتونات — لقد مضى زمن أمكن أن يظن فيه أن تركيب العالم على هذه الدرجة من البساطة — وأن الالكترونات تحمل شحنة سالبة والبروتونات شحنة موجبة وبحيث يمكن التمييز بينهما . يمكن ان نأخذ قطعة من المادة ونضيف اليها او نخرج منها بضعة الكترونات ولكن لنفترض ان الالكترونات خالدة فلا تتفجر ولاتختفي — وهذا افتراض بسيط وليس من الرياضيات في شيء — : عندها يبقى حاصل طرح العدد الكلي للالكترونات من العدد الكلي للبروتونات ثابتا لايتغير .

الواقع ، في هذا المثال بالذات ، أن العدد الكلي للبروتونات لايتغير

---

(1) ميكائيل فارادي ، ١٧٩١ — ١٨٦٧ ، فيزيائي انكليزي .

وكذلك لايتغير العدد الكلي للالكترونات . لكننا ، في الوقت الحاضر ، لن نهتم الا بالشحنة . فاسهام البروتونات هو اسهام في الموجب والالكترونات بالسالب ؛ فلو أن هذه الاشياء لاتنخلق أبدا ولاتتدمر كلا لوحده لاصبحت الشحنة الكلية منحفظة . والآن أريد ان اعدد الكميات التي تتمتع بمزية الانحفاظ وأبدأ بالشحنة (شكل ١٤) . وفي مواجهة السؤال : « هل تنحفظ الشحنة ؟ » اكتب « نعم » . وهذا التفسير النظري بسيط جدا ولكن ظهر فيما بعد أن البروتونات والالكترونات ليست خالدة ، فالجسيم المسمى نترون ، مثلا ، يتفكك الى بروتون والكترون مع شيء آخر سنراه فيما بعد .

لكن قد ثبت ان النترون حيادي كهربائيا . وهكذا ، وبالرغم من أن البروتونات والالكترونات ليست خالدة ويمكن ان تتولد من النترونات ، فان حصيلة الشحنات لا تتغير : فقد كان لدينا في البدء شحنة تساوي الصفر فاصبح لدينا شحنة تساوي زائد واحد واخرى تساوي ناقص واحد ومجموعهما يساوي الصفر . وسوى البروتون يوجد جسيم آخر ذو شحنة موجبة يشكل مثالا مشابها : انه البوزترون ، شيء بمثابة خيال الالكترون : فهو يشبه الالكترون تماما في مجمله بيد أن شحنته

	الشحنة	العدد الباريوني	الغرابة	الطاقة	العزم الزاوي
منحفظة (موضعيا)	نعم	نعم	تقريبا	نعم	نعم
تظهر على شكل وحدات	نعم	نعم	نعم	لا	نعم
منبع حقل	نعم	؟	؟	نعم	

(ملاحظة : لقد أملا فاينمان هذا الجدول شيئا فشيئا اثناء سياق المحاضرة ونحن نرسمه هنا في شكله التام)

شكل ١٤

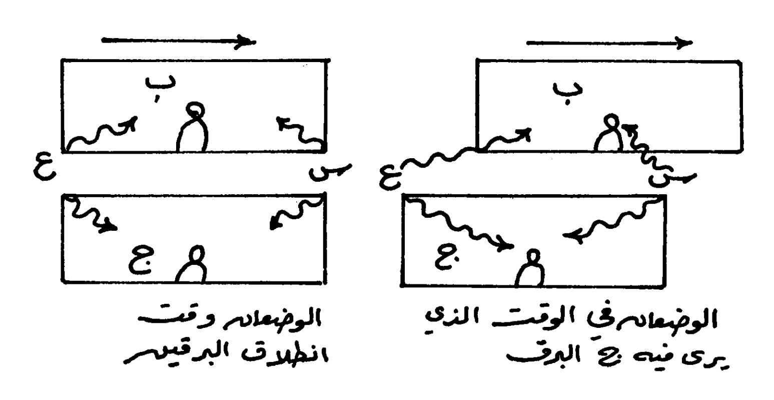
من النوع المغاير وهو يسمي ، خصوصا ، الجسيم المضاد ، لانه عندما يجتمع بالكترون يمكن أن يفنيا بعضهما ويتلاشيا دون انتاج شيء آخر سوى الضوء . وهكذا حتى الالكترونات لوحدها ليست خالدة ، فالالكترون مضافا الى البوزترون لايعطي الا ضوءا . والواقع ان هذا « الضوء » خفي على العين . انه اشعاعات غاما وهي والضوء ، عند الفيزيائي ، شيء واحد ولا يختلفان الا بطول الموجة .

فالجسيم والجسيم المضاد يمكن اذن أن يتفانيا . وليس للضوء شحنة كهربائية لكنكم اذا اخفيتم معا شحنة موجبة واخرى سالبة تساويها فلا تغيرون الشحنة الكلية . فنظرية انحفاظ الشحنة قد تعقدت اذن بعض الشيء لكنها ما تزال نظيفة من الرياضيات . اذ يكفي أن نضيف عدد البوزترونات الى عدد البروتونات ثم نطرح عدد الالكترونات . وهناك أيضا جسيمات اخرى يجب اعتبارها ، كالبروتونات المضادة مثلا ، وهي تحمل شحنة سالبة ، والميزونات بي — زائد وهي موجبة ؛ والواقع أن كل جسيم أساسي في الطبيعة له شحنة (قد تكون صفرا) . وما علينا سوى ان نقوم بالجمع حتى نحصل على العدد الكلي ؛ ومهما كان التفاعل بين الجسيمات فان كمية الشحنة الكلية في أحد طرفي التفاعل يجب أن توازن الكمية في الطرف الآخر .

هذا هو جانب من انحفاظ الشحنة . والان نصل الى نقطة مهمة . هل يكفي أن نقول ان الشحنة تنحفظ أم يجب ان نقول أكثرمن ذلك ؟ اذا كانت الشحنة تنحفظ لانها منقولة على جسيمات حقيقية فيجب أن يكون لها صفات خاصة جدا . فالكمية الكلية للشحنة ، في علبة ، يمكن أن تبقى على حالها بصورتين . فقد تغير الشحنة مكانها داخل العلبة . لكن هناك امكانية اخرى تختفي بموجبها الشحنة من نقطة وتظهر في نفس الوقت شحنة في نقطة أخرى وبحيث لاتتغير الشحنة الكلية أبدا . وهذه الامكانية الثانية ليس لها نفس الطابع ، لانه ، في

الحالة الاولى ، اذا اختفت الشحنة من نقطة وظهرت في نقطة أخرى فلا بد من أن شيئا قد عبر في الفضاء الفاصل بين النقطتين . فالاسلوب الاول لانحفاظ الشحنة يسمى الانحفاظ الموضعي للشحنة وهو اكثر تفصيلا من الملاحظة البسيطة « ان الشحنة الكلية لاتتغير » . وهكذا كما ترون نحسّن قانوننا اذا كانت الشحنة فعلا تنحفظ موضعيا . والواقع أن ذلك صحيح . هذا ولقد حاولت ، من وقت لاخر ، أن أريكم بعض الامكانيات التي تتيحها المحاكمة وهي ربط فكرة بفكرة أخرى . والان أود أن أتوسع في هذه الفكرة التي ندين بها أساسيا الى آينشتاين والتي تقول بأنه اذا كان شيء منحفظا – وهنا أطبق ذلك على الشحنة – فيجب أن يكون منحفظا موضعيا .

ان هذه الفكرة تستند الى الواقع التالي ، اذا التقي شخصان ، كل منهما في مركبة فضائية ، فلا يمكن لاي منهما ، مهما أجرى من تجارب ، أن يقول أيهما هو المتحرك وأيهما الساكن . وهذا ما يسمى مبدأ النسبية: ان الحركة المنتظمة في خط مستقيم هي نسبية ويمكن أن ننظر لكل حادث من زاويتين مختلفتين دون أن نكون قادرين على معرفة أيهما الساكن وأيهما الذي يتحرك .



شكل ١٥

لنتصور مركبتين فضائيتين ب و ج (شكل ١٥) . ولنفترض أن ب يتقدم بالنسبة لـ ج . ولاتنسوا أن هذا مجرد رأي وبا مكانكم أن تعتبروا الفرضية الاخرى فتحصلون على الظاهرة الطبيعية نفسها .
لنفترض الآن أنالرجل الساكن يريد أنيعلم هلرای، ام لا، شحنة تختفي في أحد طرفي مركبته وشحنة تظهر في الطرف الآخر وفي نفس الوقت . ولكي يتأكد من حدوث الاثنين في وقت واحد يجب عليه أن لايقف في المنطقة الامامية من المركبة لانه عندئذ يرى احدى الشحنتين قبل الاخرى بسبب الزمن الذي يستغرقه النور في انتشاره . علينا اذن ان نفترض أن الرجل يقف في منتصف المركبة تماما . وكذلك يفعل الرجل في المركبة الاخرى . لنفترض الآن أن برقا يلتمع في النقطة س دالا على تولد شحنة فيها ، وأن برقا آخر يلتمع في ع وفي نفس اللحظة دالا على اختفاء شحنة منها . لنؤكد مرة أخرى على حدوثهما في نفس الوقت وبالانسجام مع مبدأ انحفاظ الشحنة . فاذا خسرنا الكترونا في نقطة نربح الكترونا غيره في نقطة أخرى ، لكن شيئا لا يحدث البتةبين النقطتين.
وقد ندبر الامر بحيث يلتمع برق في كل نقطة يختفي أو يظهر فيهاالكترون لكي نرى ما حدث . يقول ج « ان البرقين قد ظهرا في آن واحد » لانه موجود في منتصف المركبة وأن نور البرق المتولد في س قد وصل اليه آن وصول نور البرق المتولد في ع . ويضيف ج : « نعم ، في اللحظة التي اختفت فيها الشحنة ظهرت شحنة أخرى » .
لكن ماذا سيرى صديقنا ب في المركبة الاخرى ؟ انه يقول : « كلا ، ياعزيزي ، أنت مخطىء . لقد رأيت أنا س يحدث قبل ع » . ذلك لانه كان يتقدم بمركبته نحو س فيلتقي بالنور الاتي منهقبل أن يلحق به النور الآتي من ع لانه كان يبتعد عن ع : ثم يضيف « كلا ، لقد ظهرت الشحنة في س قبل أن تختفي الشحنة من ع : فانا ، أثناء الفترةالفاصلة بين ظهور الشحنة في س واختفاء الشحنة من ع ، قد ربحت شحنة واحدة ربحا خالصا ، فلا يوجد انحفاظ للشحنة وهذا تكذيب للقانون ».
لكن ج يعود فيجيب : « لكنك أنت تتحرك » . فيقول ب : « كيف تعرف ذلك ؟ فانا أظن أنك أنت الذي تتحرك » وهكذا يستمر الحوار . فاذا

كنا غير قادرين ، بالتجربة مهما كانت ، على رؤية فرق في قوانين الفيزياء حسبما يوجد حركة أم لا ، واذا لم يكن انحفاظ الشحنة موضعيا ، فلايوجد سوى رجل واحد يصح عنده انحفاظها ، وهو الرجل الساكن بالمعنى المطلق لهذه الصفة . لكن السكون المطلق مستحيل اذا احتكمنا الى نظرية النسبية لاينشتاين ؛ وبنتيجة ذلك يستحيل أن نحصل على انحفاظ لايكون موضعيا . فالطابع الموضعي لانحفاظ الشحنة لاينفصل عن نظرية النسبية ، وهذا ينطبق على جميع قوانين الانحفاظ . ويمكن ان تروا ان هذه المحاكمة تنطبق على كل كمية منحفظة . وهناك صفة اخرى مهمة للشحنة ، صفة خاصة جدا لم يمكن حتى الآن تفسيرها بشكل مقبول ، وليس لها اية صلة بقانون الانحفاظ وهي مستقلة عنه تماما . ان الشحنة تتجلى دوما بشكل وحدات ، أي أننا عندما نحصل على جسيم نجد أن له شحنة أو شحنتين ، من النوع الموجب أو السالب.

والآن أعود الى الجدول (شكل ١٤) ، بالرغم من كونه لاعلاقة له بانحفاظ الشحنة ، والفت النظر الى أن الشيء المنحفظ يتجلى بشكل وحدات ، وفي ذلك يسر كبير لانه يجعل نظرية انحفاظ الشحنة سهلة الفهم جدا . فليست هي سوى شيء يمكن عده ويتحرك من نقطة لاخرى. وقد تأكد ، اجمالا وعلى الصعيد الفني ، ان الشحنة الكلية ، لجسم ، من السهل تعيينها كهربائيا ، لان الشحنة تتميز بطابع هام جدا هو كونها منبع الحقلين ، الكهربائي والمغنطيسي ، فهي تقيس انفعال الجسم المشحون بالحقل الكهربائي . وهكذا يجب ان نضيف صفة أخرى للقائمة : ان الشحنة هي منبع الحقل ؛ وبتعبير آخر : ان الكهرباء مرتبطة بالشحنة . موجز القول اذن : أن الشحنة ، التي تنحفظ هنا ، لها أيضا صفتان لاتمتان بصلة الى انحفاظها ، ولكنهما هامتان مع ذلك ، وهما ، أولا ، أنها تعد بالوحدات ، وثانيا ، منبع حقل .

هذا ويوجد عدد كبير من قوانين الانحفاظ . وسأعطيكم الآن أمثلة جديدة لقوانين من نوع قانون انحفاظ الشحنة ، لايحتاج الا الى التعداد. أحدها يسمى قانون انحفاظ الباريونات . ان النترون يمكن أن يتحول

الى بروتون . فاذا عددنا كلامنهما كوحدة ، نسميها الباريون ، فاننا لانفقد في هذا التحول شيئا من عدد الباريونات ، فالنترون يحمل وحدة شحنة باريونية أو يمثل باريونا ، وكذلك يمثل النترون باريونا آخر — اننا لانعمل اكثر من اختراع اسماء رنانة ! فاذا حدث ، اذن ، التفاعل الذي نتكلم عنه (تفكك النترون الى بروتون والكترون ونترينو) فان عدد الباريونات الكلي لايتغير . هذا ويوجد ايضا تفاعلات اخرى في الطبيعة . فالبروتون مع البروتون يمكن ان يعطي تشكيلة كبيرة من الجسيمات الغريبة منها ، مثلا ، جسيم لمدا Λ وبروتون وجسيم Λ زائد (ان لمدا و K اسمان اعطيا لجسمين خاصين) وفق المخطط :

$$P + P \rightarrow \Lambda + P + K^{+} \quad (\text{سريع})$$

ففي هذا التفاعل نعلم اننا نجمع بين باريونين ولكننا لا نرى،بالنتيجة، سوى باريون واحد ، ولكن من الممكن ان يكون Λ أو K ، احدهما فقط ، باريونا . واذا درسنا ، بعد ذلك ، الجسيم K نكتشف انه يتفكك ، بدوره ، وببطء شديد ، الى بروتون وبيون π ثم يتفكك البيون اخيرا الى الكترون وشيء آخر .

$$\Lambda \rightarrow P + \pi \quad (\text{بطيء})$$

والذي نراه هنا أن الباريون يظهر من جديد في البروتون وهذا يجعلنا نعتقد ان Λ يحمل عددا باريونيا يساوي واحد بينما لايحمل K سوى عدد باريوني يساوي الصفر . ففي جدول قوانين الانحفاظ كان لدينا الشحنة والآن لدينا ، مع الباريونات ، وضع مماثل يتمتع بقاعدة خاصة يتعين بموجبها عدد الباريونات بعدد البروتونات مع عدد النترونات مع عدد اللمدات مطروح من مجموعها مجموع عدد البروتونات المضادة مع النترونات المضادة .. الخ .

ان انحفاظ عدد الباريونات هو مبدأ تعدادي يتناول وحدات . ويود الفيزيائيون أن يعتقدوا أن الباريون ، تشبها بالشحنة ، هو أيضا منبع حقل . والهدف من رسم الجداول هو محاولة لنحزر قوانين

التفاعلات النووية لان ذلك واسطة سريعة ، من جملة واسطات أخرى ، نسبر بها غور الطبيعة . فبما أن الشحنة هي منبع حقل وبما أن العدد الباريوني يتصرف غالبا كالشحنة فعليه اذن أن يكون أيضا منبع حقل . لكن شيئا من هـذا لم يحدث ، مع الاسف ، حتى الآن : انـه ممكن ولكن المعلومات التي لدينا ما تزال غير كافية لتأكيده .

وبالاضافة الى ماذكرت يوجد مبدأ أو مبدآن تعداديان على هـذه الشاكلة من اجل العدد اللبتوني مثلا ... الخ لكن فكرتها لا تختلف عما في الباريونات ، بيد أن احدها مختلف قليلا . فلهذه الجسيمات الغريبة ، في الطبيعة ، سرعات تفاعل مميزة ، بعضها سريع وسهل الحدوث وبعضها الاخر بطيء جدا وصعب . ومدى الصعوبة ليس هنا بمعناه الفني في تركيب التجربة وانما في سرعة حدوث التفاعل عندما نجمع بين الجسيمات . فهناك مثلا فرق واضح جدا بين التفاعلين المذكورين اعلاه : تشظي بروتونين على بعضهما وتفكك جسيم لمدا : فالاول أسرع من الثاني بكثير . واذا لم نأخذ بعينالاعتبار سوىالتفاعلات السريعة السهلة نجد مبدأ تعداديا جديدا يكون فيه لجسيم لمدا العـدد ناقص واحد وللجسيم K^+ العـدد زائد واحد وللبروتون العـدد صفر . ذلكم هو مانسميه عـدد الغرابة ، أو الشحنة العليا . وانحفاظها قاعدة لاتصح الا في التفاعلات السريعة . فالى جدولنا (شكل ١٤) يجب أن نضيف اذن قانون انحفاظ يدعى انحفاظ الغرابة ، أو الشحنة العليا ، وهو قانون شبه صحيح . لكنه قانون مثير جدا للفضول ؛ فنحن نفهم لماذا تدعى هذه الكمية غرابة ، وصحيح انها شبه منحفظة وانها تتمثل بوحدات ، واذا حاولنا فهم التفاعلات القوية الناتجة عن القوى النووية فان انحفاظ الغرابة في هذه التفاعلات القوية قد ارشد بعض الناس الى الاقتراح التالي : ان الغرابة هي ايضا منبع حقل فيالتفاعلات القوية : ولكننا ، مرة اخرى ، لاندري عن ذلك شيئا . وأنا ما أثرت هذا الموضوع الا لكي اريكم كيف يمكن استغلال قوانين الانحفاظ كي نحزر قوانين جديدة .

وقد اقترح ، من وقت لآخر ، قوانين انحفاظ أخرى من نوعالقوانين

التعدادية . فالكيميائيون ، مثلا ، ظنوا ، في زمن ما ، ان عدد ذرات الصوديوم يبقى على قيمته مهما حدث . لكن ذرات الصوديوم ليست خالدة . فبالامكان تحويل ذرات عنصر كيميائي ما الى ذرات عنصر آخر لدرجة أن العنصر الاصلي يختفي تماما . وقانون آخر ظن صحيحا خلال فترة زمنية طويلة وينص على أن الكتلة الكلية لاي جسم تبقى ثابتة . لكن هذا يتعلق بالاسلوب الذي نعرّف به الكتلة وفيما اذا مزجنا الطاقة بالكتلة . فقانون انحفاظ الكتلة يحتويه قانون اخر ساتكلم عنه الآن : انحفاظ الطاقة .

ان انحفاظ الطاقة هو ، في جملة قوانين الانحفاظ ، اكثرها صعوبة وأكثرها تجريدا ، وهو ، مع ذلك أعظمها فائدة . لكنه ، على الفهم ، أصعب من القوانين التي ذكرتها . فالواقع ان انحفاظ الشحنة والقوانين الاخرى ذات آلية واضحة ؛ فهي ، بشكل أو بآخر ، انحفاظ انواع من الاجسام . حتى وان لم يكن هذا التعبير صحيحا تماما ، بسبب تولد جسيمات جديدة من جسيمات قديمة ، فان تلك القوانين لاتحتاج ، على كل حال ، لدى تطبيقها ، الا لعملية تعداد بسيطة . لكن انحفاظ الطاقة أعقد قليلا لان لدينا هذه المرة عددا لايتغير مع الزمن لكنه لايمثل اي جسم معين . واريد الآن أن استعمل تشبيها ، ساذجا بعض الشيء، كي اعطيكم بعض الشروح .

تصوروا ان اما تركت طفلها وحيدا في غرفة مع ثمانية وعشرين مكعبا لايمكن تكسيرها . فيلعب الطفل بهذه المكعبات طوال النهار وعندما تعود الام تتأكد من بقاء المكعبات الثمانية والعشرين على عددها: وهي في كل مرة تتأكد من انحفاظ المكعبات ! وتستمر هذه العمليات بضعة أيام . وفي احد الايام تعود الام فلا تجد سوى سبعة وعشرين مكعبا : لكنها تجد مكعبا خارج الغرفة تحت النافذة حيث القاه الطفل . فأول شيء عليكم أن تتحققوا منه في قانون انحفاظ هو أن الشيء الذي تهتمون به لم ينتقل الى الجهة الاخرى من الجدار . وقد يحدث العكس اذا جاء طفل آخر يلعب مع الاول ويجلب معه مكعبات أخرى . تلك هي ، وضوحا ، امور يجب الاهتمام بها عندما نناقش قوانين الانحفاظ .

تصوروا الآن ان الام ، وقد اتت لتعد المكعبات ، لم تجد سوى خمسة وعشرين لكنها شكت أن الطفل قد خبأ ثلاثة منها في علبة صغيرة . فتقول له : « سأفتح هذه العلبة » ؛ ويجيب الطفل : « كلا ، لايجب ان تفتحيها » . لكنها ، كأم ذكية ، تجيب : « انا اعلم أن وزن العلبة فارغة هو ٦٠٠ غرام وأن كل مكعب وزنه ١٠٠ غرام : ولهذا سأزن العلبة » . وهكذا تحسب عدد المكعباتالكلي :

$$\text{عدد المكعبات المرئية} + \frac{\text{وزن العلبة} - \text{٦٠٠ غرام}}{\text{١٠٠ غرام}}$$

فتجد ٢٨ مكعبا . بيد أنها ، في يوم آخر ، تقوم بهذا الحساب فلا تجد العدد المتوقع لكنها تلاحظ أن الماء الذي كانت قد تركته في الحوض قد ارتفع مستواه . وهي تعلم ان عمق المـاء كان ٦ سنتمترات وأن مستواه يرتفع نصف سنتمتر اذا غرق فيه مكعب واحد . وعندئذ تضيف الى معادلتها السابقة حدا آخر :

$$\text{عدد المكعبات المرئية} + \frac{\text{وزن العلبة} - \text{٦٠٠ غرام}}{\text{١٠٠ غرام}}$$

$$+ \frac{\text{عمق الماء} - \text{٦ سم}}{\text{نصف سنتمتر}}$$

وتجد ، من جديد ، ٢٨ مكعبا .

وهكذا كلما ازداد مكر الطفل ازداد ذكاء الام وراحت تضيف الـى معادلتها حدودا متتابعة ، تمثل كلها مكعبات ؛ لكنها ، من وجهة النظر

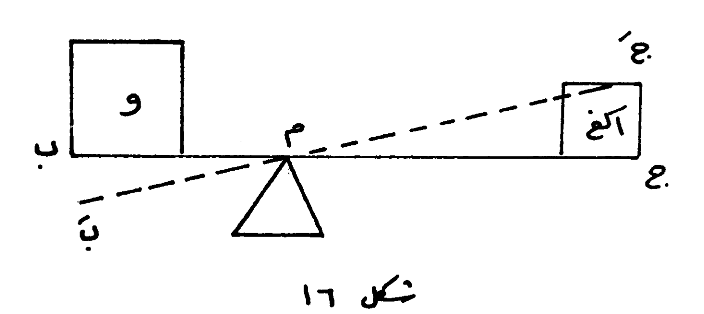
الرياضية ليست سوى حسابات تجريدية لان المكعبات تبقى غير مرئية . والان أشرح لكم وجوه التشابه والفروق بين هذا المثال وانحفاظ الطاقة. لنفترض ، في البدء ، أن الام لم تر المكعبات في أي من الاحوال . عندئذ يختفي الحد « عدد المكعبات المرئية » ، وتستمر الام في حساب عدد كبير من الحدود مثل « مكعبات في العلبة » ، « مكعبات في الماء » ... الخ . وفرق الطاقة عن ذلك هو عدم وجود مكعبات . فالطاقة ، بعكس المكعبات، لاتتمثل باعداد صحيحة . ولو افترضنا ، جدلا ، ان الام المسكينة قد وجدت أن أحد الحدود يساوي ٦ مكعبات و ١/٨ وأن حدا آخر يساوي ٧/٨ مكعب وأن حدا ثالثا أعطاها ٢١ مكعبا والمجموع ايضا ٢٨ مكعبا ، فان ذلك يشبه عندئذ انحفاظ الطاقة .

وهكذا نكون قد اكتشفنا ، من أجل الطاقة ، اسلوب عمل ذا سلسلة من القواعد . وانطلاقا من مجموعة قواعد يمكن أن نحسب عددا من اجل كل نوع من الطاقة . وعندما نجمع معا كل هذه الاعداد ، التي تضم مختلف انواع الطاقة ، نحصل دوما على المجموع نفسه . لكن ، حسب معلوماتنا، لايوجد وحدات حقيقية ، لايوجد كريات صغيرة . فالطاقة هي تجريد رياضي بحت : يوجد عدد ، غير صحيح ، يبقى على حاله في أية لحظة نحسبه . وليس بامكاني أن اعطي شرحا احسن من ذلك . والطاقة على انواع عديدة ، منها مايشبه المكعبات في العلبة ، ومنها مايشبه المكعبات في الماء ... الخ . فهناك طاقة الحركة وتسمى الطاقة الحركية ، وطاقة تنتج عن التفاعل التثاقلي ، والطاقة الحرارية ، والطاقة الكهربائية ، وطاقة الضوء ، وطاقة المرونة في النوابض ، الخ ، والطاقة الكيميائية والطاقة النووية — وهناك طاقة الجسيم الناتجة عن مجرد وجوده وهي طاقة تتعلق مباشرة بكتلته وهي من اكتشاف آينشتاين كما تعلمون حتما، وتحسب بالمعادلة الشهيرة : طا = ك × ن٢ (حيث طا تمثل طاقة الكتلة، وتمثل ك كتلة الجسم وتمثل ن سرعة النور في الخلاء) .

هذا وبالرغم من وجود هذا العدد الكبير من أنواع الطاقة ، أود أن اشرح لكم أننا لانجهل هذا الموضوع كليا وأننا نعرف العلاقات الكائنة بين مختلف هذه الطاقات . فما نسميه طاقــة حرارية مثلا ، ليس ، في خطوطه العريضة ، سوى الطاقة الحركية للجسيمات التي يتألف منها الجسم . وان طاقة المرونة والطاقة الكيميائية تنبعان من أصل واحد هــو القوى المتبادلة بين الذرات .

هذا وعندما تنتظم الذرات في بنية جديدة يحصل تغير في الطاقــة ، وعندما تتغير هذه الكمية فلابد من تغير كمية اخرى . فاذا قمنا ، مثــلا باحراق شيء ما فان الطاقة الكيميائية تتغير ولكننا نجد عندئذ حرارة في مكان لم يكن فيه حرارة ، لان المجموع يجب أن يبقى كما كان . كما أن الطاقة المرونية والطاقة الكيميائية تصدران كلتاهما عن تأثير الذرات المتبادل فيما بينها ؛ ونحن نعلم اليوم أن هذه التأثيرات المتبادلة هــي مجموع شيئين أحدهما الطاقة الكهربائية والاخر الطاقة الحركية مرة اخرى ؛ لكن الصيغة التي تعبر عن هذا الانضمام هي ، هذه المرة ، صيغة كمومية. وطاقة الضوء هي أيضا ، في الاصل ، طاقة كهربائية لان الضوء يتفسر اليوم كموجة كهربائية ــ مغنطيسية . أما الطاقة النووية فلا تتجلى كطاقة من هذه الانواع ؛ ولا أستطيع أن اقول عنها ، في الوقت الحاضر ، سوى أنها ناجمة عن قوى نووية . وانا لا اتكلم هنا عن الطاقة المنتوجة فقط . وفي نواة الاورانيوم يوجد كمية من الطاقة وعندما يصدر عن هذه النواة جسيمات ما فان الطاقة الباقية في النواة تتغير لكن الكمية الكلية للطاقة في العالم لاتتغير ؛ فنجد ، أثناء هذا الاصدار ، كمية حرارة واشياء اخرى صادرة ، بحيث ينحفظ التوازن الطاقي .

ان قانون انحفاظ الطاقة مفيد جدا في تطبيقات تقنية عديدة . واعطيكم الان بعض الامثلة البسيطة لاريكم كيف يمكن ، بمعرفة مبدأ انحفاظ الطاقة ودساتير حسابها ، أن نفهم قوانين اخرى . وبتعبير آخر ، كثــير مــن القوانين الاخرى ليست مستقلة وانما هي وسائل غير مباشرة تعبر عــن انحفاظ الطاقة ؛ وابسطها قانون الرافعة (شكل ١٦) .



شكل ١٦

رافعة يمكن أن تدور حول مرتكزها ولها ذراعان طول أحدهما ١٠سم والاخر ٤٠ سم ، يجب قبل كل شيء أن أعطي قانون الثقالة : اذا كان لدينا عدة أثقال ، نأخذ وزن كل منها ونضربه بارتفاعه عن سطح الارض ثم نضيف معا حواصل الضرب فنحصل على طاقة الثقالة الكلية. لنفترض ثقل كيلو غرام واحد على الذراع الكبيرة للرافعة وثقلا مجهولا على الذراع الاخرى ؛ يرمز عادة ب **س** للمجهول ولكن لنرمز لوزن هذا الثقل ب **و** لكي نأخذ انطباعا بالخروج عن المتداول . والمطلوب عندئذ هو معرفة قيمة هذا الوزن لكي تتوازن الرافعة تماما فتتأرجح ببطء ، وعندما تتارجح بهدوء صعودا وهبوطا فان هذا يعني أن الطاقة تبقى على قيمتها سواء كان ذراع الرافعة موازيا للارض أو كان مائلا بحيث تكون قطعة الكيلو غرام على ارتفاع سنتمتر عن الارض . فاذا كانت الطاقة كما هي فان جهة الميل لا أهمية لها اذا لم تسقط الاثقال . فاذا ارتفع الكيلو سنتمراواحدا بكم ينخفض **و** ؟ يمكن أن تروا على الشكل ١٦ أنه اذا كان طول **مب** مساويا ١٠ سم وكان **مج** مساويا ٤٠ سم ، فان **ببَ** يساوي ¼ سم اذا كان **ججَ** يساوي ١ سم . لنطبق الآن قانون الانحفاظ على طاقة الثقالة . فعندما تكون الارتفاعات مساوية الصفر في البدء فان الطاقة الكلية تساوي الصفر أيضا . ولدى الميلان نحصل على طاقة الثقالة بضرب وزن الكيلو بارتفاعه اسم ونضيف اليه حاصل ضرب الوزن **و** المجهول بارتفاعه ¼ سم (ونضع

اشارة ناقص لان الوزن المنخفض تنقص طاقته الثقالية) . فهذا المجموع يجب أن يساوي الطاقة في البدء ، أي الصفر ، أي

$$١ - \frac{و}{٤} = ٠$$ ، فنجد أن و يجب أن يكون ٤ كغ .

تلك هي طريقة لفهم هذا القانون الذي تعرفونه جيدا : قانون الرافعة. لكن يجب أن تسجلوا أن ليس فقط هذا القانون ولكن مئات القوانين الفيزيائية يمكن أن يكون لها صلات بهذا النوع من الطاقة أو ذاك . وأنا لم أشرح لكم هذا المثال الا لايضاح هذه الصلات . لكن المزعج ، بالتأكيد، أنه لايتحقق عمليا بكامل الدقة بسبب الاحتكاك عند مرتكز الرافعة على المسند . فلو كان لدي جسم يتحرك ، كرية تدرج ، مثلا ، على لوحة افقية ، فانها ستتوقف حتما بسبب الاحتكاك . فأين تذهب طاقتها الحركية ؟ الجواب أن طاقتها الحركية قد انتقلت الى طاقة حركية في ذرات اللوحة والكرية . فالعالم الذي نراه في سلم الكبائر مثل كرة جميلة حسنة التكور ومصقولة جيدا هو في الواقع معقد جدا عندما ننظر اليه في سلم الصغائر : مليارات من الذرات الصغيرة جدا ذات أشكال متنوعة وغير منتظمة . فهو يشبه حجرة ضخمة ذات شكل فوضوي عندما ننظر اليه عن قرب كاف ، لانه يتألف من هذه الكريات الصغيرة . واللوحة ، كذلك، تتألف من مجموعة متكتلة فوضوية من الكريات الصغيرة .

وعندما نجعل تلك الحصاة العملاقة تدرج على اللوحة فاننا نرى ، بالتضخيم الشديد ، الذرات في حالة اضطراب وهيجان وبعد مرور الجسم تستمر الذرات التي خلفها وراءه في اضطرابها بسبب الصدمات التي تعرضت اليها ؛ فتكتسب اللوحة اضطرابا اضافيا ، أي طاقة حرارية . ويبدو ، لاول وهلة ، ان قانون الانحفاظ خاطىء ؛ لكن الطاقة تحاول أن تتملص عن انظارنا ويجب استعمال موازين حرارة وأجهزة أخرى لنتأكد من أنها موجودة دوما . ونكتشف أن الطاقة تنحفظ دوما مهما تعقدت الحوادث حتى ولو لم نعرف تفاصيل القوانين .

ان أول برهان على قانون انحفاظ الطاقة لم يأت من فيزيائي بل من طبيب . وقد أجرى التجربة على الجرذان . فلو أحرقنا كمية من الطعام أمكن ايجاد كمية الحرارة الصادرة . فاذا أعطينا الجرذان بعدئذ كمية مساوية من الطعام فانه يتحول ،مع الاوكسيجين، الى ثاني أكسيد الفحم، كما هي الحال لدى احتراقه . وبقياس الطاقة في الحالتين نكتشف أن المخلوقات الحية تتصرف كما تتصرف الكائنات العاطلة . فقانون انحفاظ الطاقة يتحقق في حوادث الحياة كما في الحوادث الاخرى . ولنقل بهذه المناسبة أن مما يلفت النظر ان كل القوانين التي نعرفها في عالم الكائنات العاطلة تصلح أيضا عندما نتحرى صحتها في حوادث الحياة . فلا شيء يدعو الى الاعتقاد بأن مايجري عند المخلوقات الحية يختلف حتميا ، فيما يخص قوانين الفيزياء على الاقل ، عما يحدث مع الاجسام العاطلة ،بالرغم من أن الحياة ، على الارجح ، أشد تعقيدا بكثير . فكمية الطاقة المحتواة في الاغذية والتي تدلكم كم من الحرارة ، من العمل الميكانيكي ... الخ ، يمكن أن نستخلص منه ، تقاس أيضا بالحريرة . فعندما تسمعون كلمة حريرات ، كقياس للقيمة الغذائية للاطعمة لاتظنوا انكم تأكلون شيئا يسمى « حريرات » ، لكنها وبكل بساطة كمية الطاقة الحرارية المفيدة المخزونة في الغذاء .

ان الفيزيائيين أناس يميلون الى التعالي ويظنون بأنفسهم الذكاء حتى ليطيب للآخرين أن يزنقوهم. وسأقول لكم كيف تتوصلون الى ذلك . فقد كان أحرى بهم أن يخجلوا من معاملة الطاقة بهذا الشكل ، من قياسها بألف طريقة وطريقة وبأسماء شتى . وان من العبث امكانية قياس الطاقة بالحريرة وبالارغة وبالالكترون – فولت وبالكيلوغرام – متر وبالجول وبالحصان البخاري وبالكيلو واط – ساعة ؛ كل ذلك لقياس الشيء نفسه تماما . ان هذا يشبه تملك المال بالدولارات وبالليرات ... الخ ؛ ولكن ، بعكس الوضع الاقتصادي حيث يكون بين العملات نسب متغيرة ، فان نسب هذه الوحدات الحمقاء ثابتة مكفولة ، كما هو الوضع بين الليرات والفرنكات – الليرة تساوي عشرين فرنكا دوما . لكن الفيزيائي يبالغ في هذا العبث المقصود : فهو ، بدلا من أن يلجأ الى عدد بسيط مثل ٢٠ ،

لديه نسب لامعقولة مثل ١٦١٨٣١٧٨ فرنكا في الليرة . وكان يمكن أن نتوقع من نخبة الفيزيائيين ، النظريين على الاقل ، أن يستعملوا واحدة مشتركة لكننا نجد مقالات يعبرون فيها عن الطاقة بدرجات كلفن وبالميغا سيكل والان بالفرمي آخر مخترعاتهم . فمن أراد اثبات أن الفيزيائيين هم قوم عاديون كالآخرين أمكنه اثبات ذلك بسخافة هذه الواحدات المختلفة التي يستعملونها كلها لقياس الطاقة .

ان في الطبيعة ظواهر مهمة فيها قضايا طاقية طريفة . فقد اكتشف مؤخرا أشياء أطلق عليها اسم كوازارات (مفردها كوازار) وتبعد عنا بمسافات هائلة وتصدر ، على شكل ضوء أو أمواج راديو ، طاقة هائلة لدرجة أننا نتساءل من اين تأتي بها . فاذا صح انحفاظ الطاقة فان حالة الكوازار بعد اصدار هذه الكمية الضخمة من الطاقة يجب أن تختلف عن حالته قبل اصدارها . ويجب أن نبحث اذا كانت هذه الطاقة آتية من طاقة التثاقل واذا كان الكوازار قد انهار تثاقليا وتغيرت حالته التثاقلية ، أم أن هذا الاصدار الضخم ناتج عن الطاقة النووية . لا احد يعلم ذلك . وقد يخطر لكم أن انحفاظ الطاقة ليس صحيحا . لكننا اذا كنا نجهل الكثير عن شيء مثل الكوازار — ان الكوازارات تقع على مسافات هائلة لدرجة أن الفلكيين يجدون صعوبة كبيرة في رؤيتها — وبدا هذا الشيء على تناقض مع القوانين الاساسية فمن النادر جدا أن تكون القوانين هي الخاطئة بل غالبا ماينتج التناقض عن نقص في معلوماتنا .

لنذكر مثالا مهما آخر عن استعمال انحفاظ الطاقة : هو التفاعل الذي يتم بموجبه تفكك النترون الى بروتون والكترون ونترينو مضاد . فلقد ظنّ في البدء أن النترون ينقسم الى بروتون والكترون فقط . لكن طاقتي هذين الجسيمين قد قيستا فوجد أن مجموعهما أصغر من طاقة النترون . وكان هناك امكانيتان . احداهما أن قانون انحفاظ الطاقة يمكن أن لايكون صحيحا ؛ وهذا مافكر به بور (١) بادىء الامر فاصدر فرضية ان انحفاظ الطاقة صحيح فقط ، وسطيا بصورة احصائية .

---

(١) نيلس بور ، ١٨٨٥ — ١٩٦٢ ، فيزيائي دانيمركي .

لكننا نعلم اليوم أن الامكانية الثانية هي الصحيحة : فالذي يبدو من عدم أنحفاظ الطاقة ناجم عن ظهور عنصر آخر نسميه اليوم النترينو المضاد ، وهو الذي يمتص فائض الطاقة . ولكنه يفيد أيضا في مجالات أخرى كانحفاظ كمية الحركة وقوانين انحفاظ اخرى . وقد تم بعدئذ البرهان التجريبي على وجود النترينو .

ان هذا المثال يوضح نقطة جديدة هي : كيف يمكننا أن نطبق قوانيننا على مجالات لسنا متأكدين منها ؟ ومن أين أتت لنا هذه الثقة التي تسمح لنا بالاعتقاد بأن ظاهرة جديدة تطيع قانون انحفاظ الطاقة لمجرد ان هذا القانون قد تحقق في حالة قبلها ؟ وانتم ، من وقت لاخر ، تقرأون في الجرائد أن الفيزيائيين قد اكتشفوا عدم صحة أحد قوانينهم المفضلة . فهل من الخطأ القول عن قانون ما أنه ينطبق على ظواهر لم تكتشف بعد ؟ انكم لو نفيتم امكانية انطباق القاون على ظواهر لم تكتشف فلن تكتشفوا شيئا ابدا . واذا لم تعتقدوا بصحة القانون الا بعد الانتهاء من جميع التحريات فلن يمكنكم التنبؤ عن شيء أبدا . فما العلم سوى وسيلة للتقدم الى الامام ولاصدار فرضيات جديدة . ولابد لنا اذن من اقتحام المخاطر ، وأقل هذه المخاطر شأنا في الطاقة هو انحفاظها في كل مجال .

كل ذلك يعني بالطبع أن العلم ليس يقينا ؛ فما دمنا نصدر فرضية في مجال لم نفحصه بعد بأنفسنا ، فنحن بالضرورة في حالة شك . لكننا لا بد أن نقدم باستمرار آراء في مجالات مجهولة واذا لم نفعل لا نستفيد فكتلة الجسم مثلا تتغير اثناء الحركة بسبب انحفاظ الطاقة . والعلاقة بين الكتلة والطاقة تجعل الطاقة الناجمة عن الحركة تتجلى ككتلة اضافية، أي أن وزن الجسم يزداد أثناء حركته بينما كان نيوتن يظن ، على العكس، أن الكتلة تبقى ثابتة . وعندما ظهر خطأ رأي نيوتن قال الناس : « ياله من شيء رهيب . لقد اكتشف الفيزيائيون انهم مخطئون » .

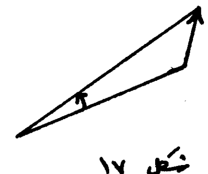
ولماذا كانوا يعتقدون بصحة آرائهم ؟ ان مفعول الحركة ضئيل جدا ولايظهر محسوسا الا عندما نقترب من سرعة النور . فاذا اطلقتم في الدوران دوامة فان وزنها أثناء الحركة لايختلف عن وزنها اثناء السكون

الا بمقدار ضئيل جدا غير محسوس . فهل يجب أن نقول اذن : « اذا لم تكن الحركة أسرع من كذا فان الكتلة لاتتغير » ؟ كلا ، لان التجربة اذا لم تتناول سوى دوامات من الخشب أو النحاس أو الفولاذ لكان علينا أن نقول : « ان الدوامات الخشبية والنحاسية والفولاذية اذا لم تتحرك بسرعة أكبر من ... » وهكذا ترون أننا لانعلم جميع الظروف اللازمة للتجربة . فلا نعلم اذا كانت كتلة الدوامة المصنوعة من مادة مشعة تبقى على قيمتها . فلابد لنا اذن من الاعتماد على فرضيات اذا كنا نريد للعلم ان يكون ذا فائدة . ولكي لانقنع بوصف تجارب قديمة فحسب لابد من تعميم تطبيق القوانين في مجالات جديدة أخرى . وليس في هذا أي ضرر اللهم الا ان نكتشف ان هذه القوانين اقل صلاحا . فاذا كنتم تظنون حتى الان أن العلم شيء مؤكد فها أنتم تدركون أنكم كنتم على خطأ .

واذا عدنا الان الى جدولنا في قوانين الانحفاظ (شكل ١٤) فيمكن أن نضيف الطاقة . فهي تنحفظ تماما حسب معلوماتنا حتى الان . وهي لاتظهر بشكل وحدات . والمسألة الان هي أن نعلم اذا كانت منبع حقل . الجواب هو نعم — لقد شرح آينشتاين أن التثاقل ينجم عن الطاقة والطاقة والكتلة متكافئتان ، لكن تفسير نيوتن الذي يقول بأن الكتلة تولد التثاقل قد تحول الى التأكيد بأن الطاقة تولد التثاقل .

هذا ويوجد قوانين أخرى تشبه انحفاظ الطاقة بمعنى انها لاتتجلى بشكل اعداد . ومنها كمية الحركة أو الاندفاع . فاذا أخذتم جميع كتل مجموعة جسيمات وضربتم كل كتلة بسرعتها ثم أضفتم هذه الجداءات معا فانكم تحصلون على مجموع هو اندفاع مجموعة الجسيمات . وهذا الاندفاع الكلي منحفظ . ونحن نعلم اليوم أن الطاقة والاندفاع مترابطان ولهذا السبب وضعناهما في عمود واحد من الجدول .

ولنذكر مثالا آخر لكمية منحفظة : العزم الزاوي الذي تكلمنا عنه قبل الان . ان العزم الزاوي يعبر عن ازدياد المساحة التي تمسحها ، خلال ثانية واحدة ، جسيمات متحركة . فلوكنا ازاء جسيم يتحرك واتخذنا نقطة ما كمركز فان السرعة التي تزداد بموجبها المساحة (شكل ١٧) التي

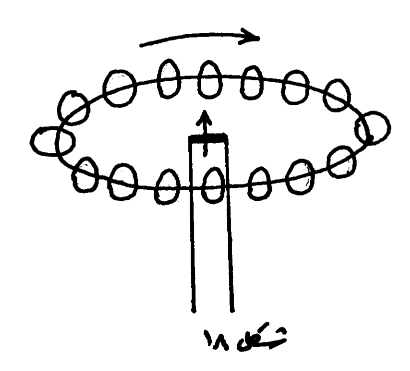


شكل ١٧

يمسحها خط يصل بين المركز والجسيم مضروبة بكتلة الجسيم ، وبعد اضافة جميع هذه الجداءات لشتى الجسيمات نحصل على مايسمى العزم الزاوي . ان هذه الكمية لاتتغير . يوجد اذن انحفاظ للعزم الزاوي . هذا وقد يظن دارس الفيزياء ، لاول وهلة ، أن العزم الزاوي لاينحفظ ؛ الا انه كالطاقة يتجلى باشكال عديدة ، وهو مهما ظن أغلب الناس ، لايتجلى فقط في الحركة ولكن في مجالات اخرى سأتكلم عنها .

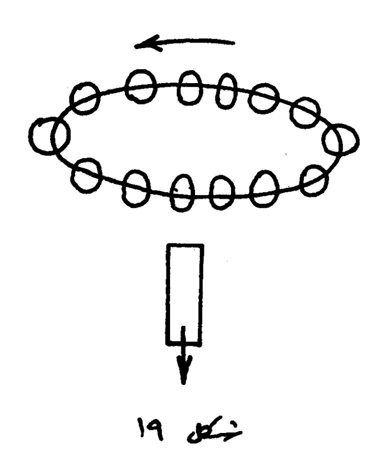
خذوا سلكا حديديا بشكل دائرة وادخلوا فيها مغنطيسا ، فيزداد تدفق الحقل المغنطيسي الذي يخترق الدائرة وتحصلون على تيار كهربائي ـ ذلك هو مبدأ مولدات الكهرباء . تصوروا الان أننا بدلنا هذا السلك بقرص يحمل شحنات كهربائية تشبه الالكترونات الموجودة في السلك (شكل ١٨) .

فمن مكان بعيد أقرب المغنطيس سريعا ، متبعا خط محوره تماما ، حتى أصل الى القرص مما يولد تغيرا في التدفق . وكما يحدث في السلك



شكل ١٨

تبدأ الشحنات بالدوران . ولو كان القرص محمولا على محور دوار لراح يدور عندما يقترب منه المغنطيس . وهذا يبدو ، لاول وهلة ، متناقضا مع انحفاظ العزم الزاوي : عندما يكون المغنطيس بعيدا لايدور شيء وعندما يصل المغطيس يبدأ شيء بالدوران ، فنحصل على دوران مجاني ، مما يتناقض مع القوانين . والان أعلم أنكم ستقولون : « لابد من وجود تأثير اخر يجعل المغنطيس يدور في الاتجاه المعاكس » . ليس هذا صحيحا . لايوجد قوة كهربائية تجعل المغنطيس يدور في الجهة المعاكسة . واليكم الشرح : ان العزم الزاوي يظهر بشكلين : العزم الزاوي للحركة والعزم الزاوي للحقلين الكهربائي والمغنطيسي . اي يوجد عزم زاوي في الحقل الذي يحيط بالمغنطيس ولكن ليس بشكل حركي وله اشارة معاكسةللعزم الدوراني . ولو اعتبرنا الوضع المعاكس لاتضح الامر اكثر (شكل ١٩) .

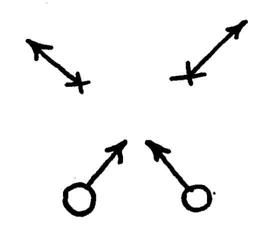


شكل ١٩

فاذا لم يكن يوجد سوى الجسيمات والمغنطيس متجاورة وساكنة فهذا يعني وجود عزم زاوي في الحقل بشكل خفي ودون أن يتجلى بشكل دوران فعلي . وعندما نسحب المغنطيس نفصل الجهاز وتنفصل الحقول كلها وعندئذ لابد ان يتجلى العزم الزاوي . فيأخذ القرص بالدوران . انه قانون التحريض الكهربائي الذي يجعله يدور .

يصعب علي أن أشرح اذا كان العزم الزاوي يتجلى بشكل وحدات. فلأول وهلة يبدو ذلك مستحيلا لان العزم الزاوي يتعلق بالمنحى الذي تختلف قيمته عندما تنظرون اليه جانبيا بدلا من النظر اليه مواجهة . لنقبل اذن جدلا أن العزم الزاوي يتجلى بشكل وحدات : فتنظرون مثلا شيئا يعطي ٨ وحدات ثم تنظرون اليه بميل صغير جدا! فيختلف عدد الوحدات قليلا جدا . ربما أقل من ٨ بقليل . لكن العدد ٧ ليس أقل بقليل من ٨ ، بل اقل بشكل محسوس . فالعزم الزاوي لا يمكن اذن ان يتجلى بشكل وحدات . لكن هذا الاثبات لا يفشل في المحاكمات الدقيقة الخاصة بميكانيك الكم حيث اذا قيس العزم الزاوي على اي محور كان فان هذا العدد يتجلى ، وهذا أمر عجيب ، بشكل وحدات . لكن هذه الوحدات لا يمكن عدها كالشحنات الكهربائية، بل هي وحدات بالمعنى الرياضي لهذه الكلمة ؛ اي أن العدد المحصول عليه في قياس ما هو عدد صحيح من المرات من واحدة ما . لكن هذا لا يمكن مقارنته بوحدات الشحنة الكهربائية ، تلك الوحدات التي يمكن تصورها وعدها ـ واحدة ، اثنتان ، ثلاث .

لكن فيما يخص العزم الزاوي ، لا يمكن ان نتصور وحدات منفصلة بل نحصل دوما على عدد صحيح . . . هذا عجيب ! ويوجد قوانين انحفاظ أخرى أقل أهمية من تلك التي تكلمنا عنها ولا تتناول بالضبط انحفاظ اعداد . تصوروا وضعا ما تحترم فيه الجسيمات المتحركة تناظرا معينا كالتناظر المضاعف الوارد في الشكل ٢٠ . فاذا صدقنا قوانين الفيزياء يمكن أن نتوقع أننا سنجد هذا التناظر المضاعف بعد فترة زمنية أخرى



شكل ٢٠

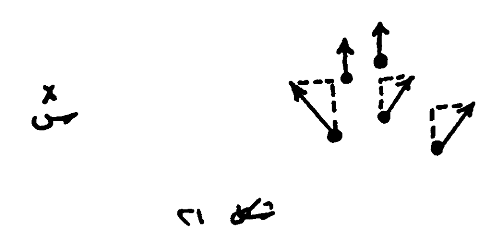
تكون خلالها هذه الجسيمات قد تحركت وتصادمت ما طاب لها أن تتحرك وتتصادم . يوجد اذن هنـا نوع من الانحفاظ ، هو انحفاظ خاصية « التناظر » ؛ ويجب أن نسجله في جدولنا ولكن ليس كعدد يمكن قياسه ؛ وسنناقشه بالتفصيل في المحاضرة القادمة .

لماذا ليس لهذا أهمية كبيرة في الفيزياء التقليدية ؟ لان من النادر أن تجدوا ظروفا بدئية يكون التناظر فيها على هذه الدرجة من الجمال . وقانون الانحفاظ هذا ليس على هذه الدرجة من الاهمية والفائدة فيالحياة العملية . وبالمقابل في ميكانيك الكم عندما نكون ازاء جملة بسيطة جدا ، كالذرات ، فان بنيتها الداخلية تتسم غالبا بنوع من التناظر ، كالتناظر المضاعف ، وخاصية التناظر هذه منحفظة . فلهذا الانحفاظ اذن أهمية كبيرة في فهم الظواهر الكمومية .

وهنا ينطرح سؤال هام : هل لقوانين الانحفاظ هذه أسس عميقة أم أن علينا أن نقبلها كما هي ؟ سأعالج هذه القضية في محاضرتي القادمة لكن اريد أن أبدي ملاحظة منذ الآن . اذا ناقشنا هذه المفاهيم فيمستوى التبسيط فلا نرى ظاهريا بينها أية علاقة ، لكن الفحص الجدي العميق لمختلف القوانين هذه يكشف عن صلات عميقة فيما بينها ، وكل فكرة تجر افكارا اخرى . ونسوق ، كمثال ، العلاقة بين مبدأ النسبية من جهة وضرورة الانحفاظ الموضعي من جهة أخرى . فهذه العلاقة ، لو لم نبرهن عليها لبدت أشبه بالمعجزة : اذا لم نتمكن من الشعور بالسرعة التينتحرك بها فهذا يدل على أن الاشياء المنحفظة لا يمكن أن تنحفظ اذا كان بامكانها ان تقفز من مكان لآخر !

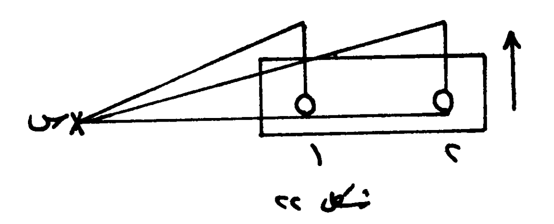
وبوصولنا الى هذه المرحلة أريد ان أشرح كيف أن انحفاظ العزم الزاوي وانحفاظ الاندفاع وبعض المظاهر الاخرى هي ، الى حد ما ، مترابطة فيما بينها . ان انحفاظ العزم الزاوي يرتبط بالمساحة التي تمسحها الجسيمات في حركتها . فاذا كنا ازاء عدد كبير من الجسيمات (شكل ٢١) واتخذنا المركز س بعيدا جدا فان ابعاد الجسيمات عنه تكون متماثلة فيما بينها .وفي هذه الحالة المهم هو مركبة الحركة الشاقولية

على الشكل ٢١ . فهي التي تدخل في المساحة الممسوحة او في انحفاظ العزم الزاوي .



شكل ٢١

نكتشف عندئذ أن مجموع الكتل ، بعد ضرب كل منهــا بسرعتهــا الشاقولية ، يجب أن يكون ثابتا لان العزم الزاوي ثابت بالنسبة لايــة نقطة ، واذا كانت النقطة المختارة بعيدة جدا فان ما يهم عندئذ هو الكتل والسرعات . وبهذه الصورة فان انحفاظ العزم الزاوي يحوي انحفاظ الاندفاع والذي يحوي ، هو بدوره ، شيئا آخر هو انحفاظ كمية اخرى مرتبطة بالاولى ارتباطا وثيقــا والتي لم اكلف نفسي عناء تسجيلهــا في الجدول . انه مبدأ يخص مركز الثقل (شكل ٢٢) .



شكل ٢٢

ان كتلة ، في علبة ، لا يمكن أن تمر لوحدها من مكان لآخر . ليس لهذا اية علاقة بانحفاظ الكتلة ؛ لان الكتلة موجودة وهي لم تغير سوى مكانها . ان الشحنة هي التي يمكنها أن تفعل ذلك وليس الكتلة . واليكم السبب : ان قوانين الفيزياء لم تتغير بالحركة المنتظمة المستقيمة ، فيمكن أن نفترض أن العلبة تتحرك ببطء نحو الاعلى . لنأخذ الآن العزم الزاوي

من نقطة س ، واقعة على مسافة قريبة . فاثناء صعود العلبة اذا كانت الكتلة ساكنة في مكانها فانها تمسح ، في الوضع ١ مساحة بسرعة معينة . وعندما تكون الكتلة قد انتقلت الى الوضع ٢ فان المساحة الممسوحة تزداد بسرعة اكبر ، لان الوضع ٢ موجود على نفس الارتفاع ولكن على مسافة من س اكبر . لكن انحفاظ العزم الزاوي يمنع تغير سرعة ازدياد المساحة ولذلك لا يمكن تغيير مكان الكتلة ، الا اذا أمكن أن ندفع بكتلة اخرى وبحيث لا يتغير العزم الزاوي . ولهذا فليس من المفروض أن تتحرك الصواريخ في الخلاء . . . ، ولكنها مع ذلك تفعل . لنتصور اذن كمية من الكتل ؛ فاذا دفعنا احداها الى التقدم ، يجب أن ندفع أخريات الى التراجع وبحيث تكون الحركة الكلية لجميع الكتل ، تقدما وتراجعا، معدومة . وبهذه الصورة يتحرك الصاروخ ؛ فهو ساكن في البدء ؛ ثم يبدأ حتى في الخلاء ، بقذف كمية من الغاز من مؤخرته الى الوراء ويتقدم بجسمه الى الامام . والمهم أن يبقى مركز الكتل لجميع مادة العالم في مكانه بالضبط كما كان . فالقسم الذي يهمنا انطلق الى الامام أما القسم الذي لا يهمنا في شيء فقد تراجع . والنظرية لا تقول بأن القسم المهم هو الذي ينحفظ ، بل الكمية الكلية هي المنحفظة .

ان اكتشاف قوانين الفيزياء عملية تشبه تجميع القطع في احجية . ونحن عندنا الآن كثير من القطع المختلفة وهي تزداد كل يوم ! وهناك قطع كثيرة باقية دون استعمال ولا ندري أين مكانها بين الآخرين . وكيف نعرف أنها تشكل قطعا متناثرة للوحة واحدة لم تتضح صورتها بعد ؟ فنحن لسنا متأكدين وهذا يقلقنا بعض الشيء ، لكن وجود خواص مشتركة لقطع عديدة يعطينا الشجاعة على المثابرة . فهي كلها مثلا تقع تحت سماء زرقاء ، او مصنوعة من خشب واحد . وكل قوانين الفيزياء ، على تنوعها، تطيع مبادىء الانحفاظ ذاتها .

٤

تناظر قوانين الفيزياء

ان للتناظر فعل السحر في العقل البشري . فنحن نحب أن نرى ما هو متناظر في الطبيعة كالكرات الضخمة المتناظرة تماما وهي الكواكب والشمس، وكالبلورات المتناظرة لندائف الثلج وكبعض الزهور . على أنني لن أتحدث اليوم هنا عن تناظر الاجسام في الطبيعة بل عن تناظر قوانين الفيزياء نفسها . فمن السهل ان نفهم كيف يكون جسم متناظرا ولكن ما معنى أن يكون قانون متناظرا ؟ لا شيء طبعا . لكن الفيزيائيين مولعون باستعمال كلمات دارجة في معان خاصة . وفي هذه الحالة بالذات تعطيهم القوانين الفيزيائية انطباعا قريبا جدا من الانطباع الذي يحدثه تناظر الاجسام ، وهذا ما جعلهم يتكلمون عن تناظر القوانين . وهذا ما سأتحدث عنه الآن.

ما هو التناظر ؟ انظروا الي ّ : انني متناظر ، يمينا ــ يسارا (في الظاهر على الاقل) ، والاناء يمكن ان يكون متناظرا بشكل أو بآخر . فكيف نعرّف هذه الفكرة ؟ ان القول انني متناظر يمينا ــ يسارا يعني انه اذا نقلتم كل عضو مني موجود في جهة الى الجهة المقابلة فان مظهري يبقى تماما كما كان عليه . والمربع شكل هندسي ذو تناظر خاص ؛ فلو دوّرته بـ ٩٠ درجة لا يتغير . هذا وقد أعطى الرياضي ڤايل[1] تعريفا جيدا للتناظر : نقول عن شيء انه متناظر اذا لم يتغير مظهره بعد اجراء فعل معين عليه . ذلك هو ما نعنيه عندما نقول عن قانون فيزيائي انه متناظر : فيمكن ان نطبق عليه فعلا معينا دون أن يغير ذلك شيئا من

(١) هرمان ڤايل ، ١٨٨٥ ــ ١٩٥٥ ، رياضي الماني .

نتائجـه . ذلك هو مظهر القوانين الفيزيائية الذي سنوضحـه اليوم . وابسط مثال على هذا النوع من التناظر (وهو تناظر سترون انه يختلف عن التناظر المألوف الذي يخطر لكم كالتناظر يمين ـ يسار) هو الانسحاب في الفضاء . وهذا يعني ما يلي : اذا بنيتم جهازا ما أو قمتم بتجربة مـا على أشياء ما ، ثم ذهبتم فبنيتم جهازا مماثلا تماما أو قمتم بتجربـة مماثلة تماما على أشياء مماثلة تماما ولكن في مكان آخر بينه وبين المكان الاول مجرد انسحاب مكاني فستحصلون في التجربة المنسحبـة علـى نتائج مماثلة تماما لنتائج التجربة الأصلية . الحق أن هذا ليس صحيحا في الواقـع . فلو بنيت فعـلا جهازا ثم سحبتـه ٦ امتار الى يسـاري فسيصطدم بالجدار واقع في مشكلة . وعلينا عندما نعرّف مفهوما ما أن نأخذ بعين الاعتبار كل ما يمكن أن يغير الظروف الموضوعية ، وعلينا هنا أن نسحب كل شيء مع الجهاز . فاذا كان الجهاز نواسا مثلا وسحبتـه ٣٠ كيلو مترا الى اليمين فان التجربة لا تسير تماما كما كانت تسير لان النواس يتأثر بجاذبية الارض . يمكن مع ذلك أن اتصور أنني أسحب الارض مع الجهاز فتسير الامور كما سارت . فالمسألة تتطلب اذن أن نسحب كل ما يمكن أن يؤثر على الظروف الموضوعية . ويبدو في هـذا القول شيء من الجنون ، وكأننا نقول : نسحب التجربة مع ظروفها واذا لم تسر الامور كما نتوقع فهذا معناه اننا لم نسحب معها ما يكفي ... ثم نسحب أشياء بعد أشياء حتى يحدث مانريد . الواقع أن الامور لاتتم بهذا الشكل ؛ فليس من المؤكد تلقائيا أن يحدث ماتريدون . لكن الامر الذي يلفت النظر في الطبيعة هو امكانية سحب ما يكفي من الاشياءلتتطابق النتائج مع ما كانت عليه . وكفى بذلك نصا ايجابيا .

واليكم بعض الاثباتات . لنأخذ مثلا قانون التثاقل الذي يقول بأن القوة بين جسمين تتغير كمقلوب مربع المسافة بينهما ؛ واذكّركم أن الجسم ينفعل بالقوة فيغير سرعته ، بمرور الزمن ، باتجاه القوة . فلو كنت ازاء جسمين ، كوكب يدور حول الشمس ، وسحبت مجموعة الجسمين معا فان المسافة بينهما لا تتغير بالتأكيد ولا تتغير بالتالي القوة بينهما . واكثر من ذلك فان الجسمين بعد سحبهما يستمران في الحركة بنفس السرعـة

وتبقى التغيرات على حالها وتستمر الجملتان في الدوران كما كانتا تفعلان. فاذا كان القانون يقول : « المسافة بين جسمين » بدلا من « مسافة مطلقة عن مركز العالم » فذلك لان القوانين يمكن أن نسحبها في المكان .

ذلك هو النوع الاول من التناظر : الانسحاب في المكان . أما الثاني فيمكن أن نسميه الانسحاب في الزمان . ولكن من الاوضح أن نقول أن فرقا في الزمان لا يغير شيئا . لنقذف بكوكب حول الشمس في منحى ما ؛ فلو كان بالامكان أن نعاود القذف بعد ساعتين ، أو سنتين ، وأن نبدأ من جديد مع الكوكب والشمس في نفس الظروف الاولى لسارت الامور تماما كما كانت تسير ، لان قانون التثاقل يتحدث عن السرعة ولا يقول شيئا عن الوقت المطلق الذي يفترض أن تبدأوا فيه قياساتكم . بيد اننا ، في هذا المثال بالذات ، لسنا متأكدين حقا . فنحن عندما تكلمنا عن قانون التثاقل ذكرنا امكانية تغير قوة التثاقل بمرور الزمن ؛ وهذا يعني أن الانسحاب في الزمان ليس اقتراحا موفقا لانه اذا تغير « ثابت » التثاقل فاصبح بعد مليار سنة اضعف مما هو الآن فليس من الصحيح ان حركة جملة الكواكب والشمس ستبقى بعد مليار سنة كما هي الآن .

لكن معلوماتنا الحالية اليوم (واكتفى بالكلام عن القوانين كما نعرفها اليوم : وليتني استطيع أن أتكلم عن القوانين كما سنعرفها في الغد !) توحي بأن انسحابا في الزمان لايغير شيئا .

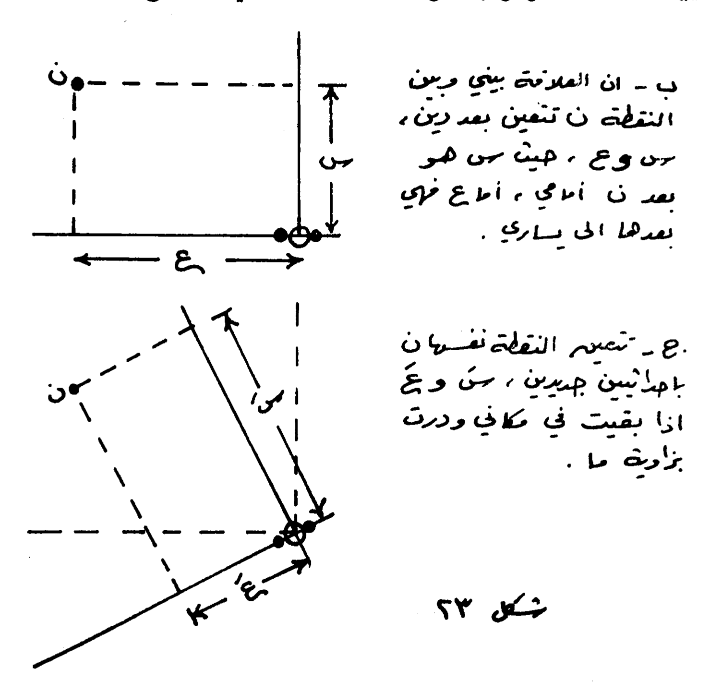
على اننا نعلم يقينا انها فكرة ليست صحيحة تماما من وجهة نظر اخرى ، وصحتها لاتتعدى مانسميه اليوم القوانين الفيزيائية : لكن احد مظاهر هذا العالم (ربما كانت الحقيقة خلاف ذلك) يمكن أن تتفسر وكأن الوجود كله قد بدأ في لحظة معينة وتطور كما يحدث في انفجار عملاق . ويمكن أن نسمي ذلك ظرفا جغرافيا من جملة الظروف الموضوعية التي يجب ان اسحبها عندما اجري انسحابا في المكان . وبتعبير مماثل يمكن أن اقول ان القوانين تبقى كما هي ازاء انسحاب زماني ويجب ان اسحب انفجار العالم مع سائر ما اسحبه من ظروف . وربما كان بالامكان اجراء محاكمة يعاود بموجبها العالم سيرته من جديد بعد

زمن ما : لكن اعنة هذا الزمان وهذا الوجود ليست في أيدينا ولسنا اسياد الكون ولا نملك اية وسيلة للتأكد من هذه الفكرة بالتجربة . ولو تعمدنا أن نبقى في مجال العلم المؤكد لما حصلنا على شيء . لكن الواقع المفروض هو ان ظروف العالم تبدو متغيرة في الزمان ، والمجرات تتباعد ؛ واذا أردتم أن تعيشوا قصة وهمعلمي ، فيعصر مجهول ، يمكنكم ان تقيسوا الزمن بقياس المسافات فيما بين المجرات . وهذا يعني أننا لو رجعنا في الزمـان الـى الوراء لمـا رأينا العالـم في المظهـر الـذي نراه اليوم .

هذا ويصطلح العلماء على فصل القوانين الفيزيائية ، التي تفسر حركة الاشياء بدءا من وضع معين ، عن دراسة أصل العالم لاننا لانعلـم عن هذا الموضوع الاخير الا النزر اليسير . ويعتبر عموما التاريخ الفلكي ، او تاريخ العالم ، شيئا مختلفا عن القانونالفيزيائي .ومعذلك لو تحداني احدكم في أن اذكر لكم الفرق بينهما لاعياني ذلك . فأهم خاصية للقانون الفيزيائي هو شموليته ، او عالميته ، وهل هنالك شيء أكثر شمولية ، او عالمية ، من استمرار السدم في التوسع ؟ فانا حقيقة لا أعلم كيف احدد هذا الفرق . واخيرا ورغم كل ذلك اذا قررت أن اضرب صفحا عن اصل العالم وان لا اهتم بغير القوانين الفيزيائية المعروفـة أمكنني ان أقول ان تأخرا في الزمان لايغير فيها شيئا .

لنأخذ امثلة اخرى على قوانين التناظر . احدها هو الدوران في المكان ، دوران معين . اذا قمنا بتجارب بواسطة تجهيزات مركبة في مكان ما ، ثم ركبت تجهيزات اخرى مماثلة للاولى تماما (ربما بسحبها قليلا لكي لانعيق العمليات) ولكنها مدارة بحيث يكون كل محور قـد تغير اتجاهه فان النتائج تبقى كما كانت . ومرة اخرى يجب أن ندير كل ما يمكن أن يتدخل موضوعيا في التجربة . فلو كنا ازاء ميقاتية ذات رقاص من ميقاتيات اجدادنا واردنا تدويرها لوضعها بشكل افقي فان رقاصهـا سينبطح على جـدار الصندوق ويتوقف . لكنكم اذا أدرتم

الارض أيضا (وهذا مايحدث لها باستمرار) فان الرقاص يستمر في حركته . هذا وان الوصف الرياضي لامكانية التدوير هذه مهم الى حد ما. فلوصف مايجري في ظرف معين نستخدم الاعداد التي تدل على مكان الجسم والتي نسميها احداثيات النقطة ويلزم ثلاثة في الحالة العامة لتعيين ارتفاع النقطة وبعدها الى اليمين وبعدها الى اليسار . وفي هذه الحالة بالذات لن أهتم بالارتفاع لانني أحتاج ، لدى التدوير ، الى احداثيين فقط . لنرمز بـ **س** للمسافة أمامي و بـ **ع** للمسافة الى



شكل ٢٣

يساري . وبهذين العددين يمكن أن اعين مكان اي جسم بالنسبة لي : أمامي والى يساري . فمن كان منكم أصله من نيويورك يعلم أن البيوت تتعين أماكنها برقم الشارع ورقم البيت في الشارع (على الاقل قبل ان يتغير اسم الشارع السادس) .

والمظهر الرياضي للتدوير هو التالي : اذا عينت مكان نقطة كما فعلت بواسطة احداثييها **س** و **ع** وعين شخص ، ينظر في اتجاه آخر ، مكان النقطة نفسها بنفس الطريقة وبالنسبة اليه بعددين آخرين **سَ** و **عَ** (شكل ٢٣) أمكن التأكد من أن العدد **س** الخاص بي هو مزيج من

الاحداثيين **س َ** و **ع َ** كما تصبح **ع** مزيجا من **س َ** و **ع َ** أيضا . وقوانين الطبيعة تتمتع بخاصة أنها لايتغير شكلها اذا بدلنا فيها كلا من **س** و **ع** بالمزيجين المذكورين هذين . وبهذه الصورة يتجلى التناظر في الشكل الرياضي . فنكتب المعادلات بأحرف ما ، ويوجد طريقة لتغيير الاحرف **س** و **ع** بمزائج **س َ** و **ع َ** : فاذا أجرينا هذا التبديل نرى أن المعـادلات لايتغير شكلها الا بظهور فتحات هنا وهناك . وهذا يعني ان الشخص الآخر سيرى بواسطة جهازه نفس الظواهر التي اراها انا في جهازي المدار باتجاه آخر .

والآن أسوق لكم مثالا قانون تناظر هاما : وهو يتناول سرعة ثابتة في خط مستقيم . ويعتقد أن حركة بسرعة ثابتـة في خط مستقيم لاتغير قوانين الفيزياء . انه مبدأ النسبية : اذا كان شخص في مركبة فضائية فيها أجهزة عاملة وشخص آخر في مكان ما على الارض ومعه اجهزة مماثلة ، وكانت المركبة الفضائية تتحرك بسرعة مستقيمة ثابتـة فان الشخص الذي يرصد فيها مايحدث على جهازه يرى نفس ما أراه انا ، الساكن على الارض ، على جهازي ؛ اللهم الا اذا تطلع الـى الخارج أو ارتطم بحاجز خارجي أو فعل شيئا من هذا القبيل : ولكنه اذا ما استمر في حركته في خط مستقيم وسرعة ثابتة فان قوانين الفيزياء تتجلى له بالشكل الذي أراها فيه . ومن وجهة النظر هذه لايمكن أن أقول أينا الذي يتحرك .

وعلي هنا ، قبل أن استرسل في الحديث ، ان أؤكد ان في هـذه التحويلات جميعها وهذه التناظرات لاحاجة لتحريك العالم . لنأخذ حالة الزمان : فنحن لانتعلم شيئا اذا نقلنا بالخيال جميع أزمان العالم كله . وكذلك لافائدة مـن اصدار نص مجاني يقول : اذا أخذت كل موجودات العالم وسحبتها الى مكان آخر فان سلوكها لن يتغير . لكن الشيء الذي يلفت النظر هو التالي : اذا أخذت تجهيزات ماوسحبتها ثم تحققت من مجموعة نتائج (ولو احتاج الامر الى اضافة قطع جديدة) فهذا معناه أنني قد حركت قسما من العالم ، بالنسبة لمتوسط أوضاع جميع النجوم ، دون أن ينغير شيء . وهذا ، في حالة النسبية ، يعني أن الشخص الذي يتحرك بسرعة ثابتة في خط ستقيم ، بالنسبة لمتوسط

اماكن جميع السدم ، لايشعر بحركته . وبتعبير اخر : ان من المستحيل ان نؤكد ، من خلال تجارب تجري ضمن سيارة ودون ان نتطلع الى الخارج ، فيما اذا كنا نتحرك بالنسبة لمجموعة النجوم .

لقد كان نيوتن اول من لفظ هذا النص (١) . لنأخذ قانونه في التثاقل ؛ فهو يقول بأن القوى تتناسب مع مقلوب مربع المسافة وأن القوة تولد تغيرا في السرعة . لنفترض الان أنني اكتشفت مايحدث عندما يدور كوكب حول شمس ثابتة وانني اريد الان أن اكتشف ما يحدث عندما يدور كوكب حول شمس متحركة . ان كل السرعات التي حصلت عليها في الحالة الاولى ستتغير ، ويجب علي أن اضيف سرعة ثابتة . لكن القانون ينص على **تغيرات** السرعة ، والذي يحدث اذن هو ان تغيري سرعتي الكوكبين سيكونان متطابقين ، مثل القوة التي تؤثر في جملة تتألف من كوكب وشمس متحركة . وهكذا يمكنني في حالة الكوكب الثاني ان ادخل سرعة اضافية تبقى ثابتة وتنضاف اليها جميع التغيرات. والنتيجة الرياضية الواضحة هي : اذا أضفنا سرعة ثابتة فان القوانين تبقى تماما على ماهي عليه . فنحن لايمكننا اذن أن نعلم ، من خلال دراسة الجملة الشمسية ومدارات الكواكب حول الشمس ، اذا كانت الشمس نفسها تتحرك في الفضاء .

فبموجب نيوتن ليس لهذه الحركة في الفضاء اي تأثير على حركة الكواكب حول الشمس ؛ ويضيف نيوتن : « ان حركة الاجسام فيمابينها، في مكان ما ، لا تتغير سواء كان هذا المكان ساكنا بالنسة للنجوم الثابتة أو متحركا في خط مستقيم بسرعة ثابتة » .

ولقد مر ، منذ نيوتن ، زمن طويل اكتشفت خلاله قوانين جديدة ، منها قوانين مكسويل (٢) في الكهرباء . وهذه القوانين تؤكد وجود

---

(١) ليس هذا صحيحا تماما . فقد أعطى غاليلة (فيزيائي ايطالي ، ١٥٦٤ ـ ١٦٤٢) نصا واضحا لهذا المبدأ . (المترجم) .

(٢) جيمس كلارك مكسويل ، ١٨٣١ ـ ١٨٧٩ ، أول أستاذ للفيزياء التجريبية في كمبريدج .

أمواج ـ الامواج الكهرطيسية التي يؤلف النور مثالا عليها ـ تسير في الخلاء بسرعة ثابتة تساوي ... ٣٠٠ كيلو متر في الثانية ، أقصد ... ٣٠٠ كيلو متر في الثانية في جميع الاحوال . وقد يبدو لنا عندئذ من الممكن تعيين من يتحرك ، لان القانون الذي يقول ان النور يتحرك ب ... ٣٠٠ كم في الثانية لايسمح بالتأكيد (لاول وهلة) لشخص أن يتحرك دون أن يظهر أثر لحركته . فمن الواضح (أليس كذلك ؟) أنكم اذا كنتم في مركبة فضائية تتحرك بسرعـة ... ٢٠٠ كم في الثانية في اتجاه ماوكنت انا ساكنا وأرسلت اليكم حزمـة ضوئية تلحق بكم بسرعـة ... ٣٠٠ كم في الثانية وتدخل عليكم من خلال ثقب في غلاف المركبة ، وعندما تخترق الحزمة المركبة التي تبتعد بسرعة ٢٠٠٠٠٠ كم / ثانية سيخيل اليكم أن الضوء يتحرك بسرعة ١٠٠٠٠٠ كم / ثا فقط . ومـع ذلك لو اجريتم التجربة فستتأكدون أنكم ترون الضوء يتحرك بسرعـة ... ٣٠٠ كم/ثا كما أراه أنا أيضا يتحرك بسرعة ... ٣٠٠ كم/ثا .

ان قوانين الطبيعة لاتفهم كلها بسهولة كبيرة . ونتيجة هذه التجربة ما تزال مناقضة للحس السليم لدرجة أن كثيرا من الناس مازالوا كافرين بها .

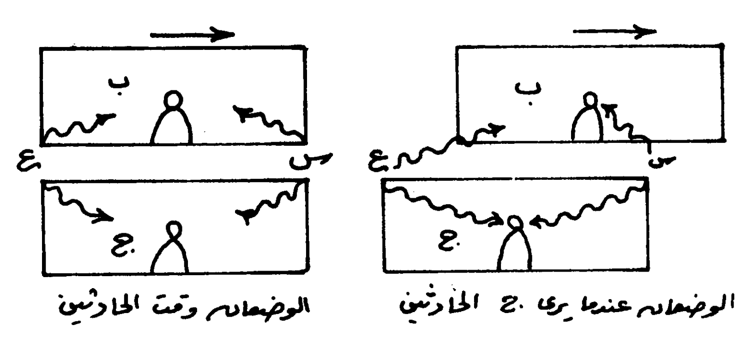
وقد تتابعت التجارب واثبتت كلها أن السرعة ... ٣٠٠ كم/ثا لاتتغير مهما كانت سرعة الشخص المتحرك الذي يقيسها . ولكن كيف يتفسر ذلك ؟ لقد اتفق اينشتاين وبوانكاريه (١) على الجواب الوحيد التالي : اذا كان شخصان ، احدهما متحرك والاخر ساكن ، يجدان بالقياس عددا واحدا لسرعة واحدة فذلك لان احساسيهما بالزمان ، وكذلك بالمكان ، ليسا متطابقين ؛ أي لان النواس الموجود داخل المركبة الفضائية لايتحرك بنفس السرعة التي له على الارض ... الخ . وربما تجيبون : « حسنا ، لكن اذا كانت الميقاتية تقول تيك ـ تاك وأنا أنظر اليها في المركبة فيمكنني ان أشعر بأنها تقصر » . وأنا اجيبه : « كلا ، لان مخك سيقصر أيضا » .

---

(١) جول هنري بوانكاره ، ١٨٥٤ ـ ١٩١٢ ، عالم فرنسي .

وبعد التأكد من أن الامور تتم كما ذكرنا داخل المركبة الفضائية يمكن أن ننشيء علما يتكلم عن داخل الصاروخ بلهجة ......٣٠٠٠ « كم – صاروخ » في « ثانية – صاروخ » وعن الارض هنا بلهجة ......٣٠٠٠ كم من كيلومتراتي في الثانية الواحدة من ثواني . ان هذا دقيق على الفهم لكن اعجب الامور أن الامور تتم كذلك .

لقد ذكرت سابقا نتيجة لمبدأ النسبية وهي عدم امكانية تعيين السرعة التي نتحرك بها في خط مستقيم . ولا بد انكم ماتزالون تتذكرون في محاضرتي السابقة مثال المركبتين **ب** و **ج** (شكل ٢٤) .



شكل ٢٤

كان برق يلتمع في كل طرف من المركبة **ج** ، وكان رجل في مركـز المركبة وكان البرقان (**س** و **ع**) يلتمعان عند كل طرف من مركبته فـي لحظة معينة ، وكان يرى من جهته ان البرقين يلتمعان في آن واحد لانه موجود في مركز المركبة . لكن رجل المركبة **ب** الذي يتقدم بسرعة ثابتـة نحو **ج** يرى البرقين نفسيهما منفصلين في الزمان ؛ والواقع انه يـرى برق **س** يصل اليه قبل برق **ع** لانه يتقدم . وهكذا ترون احدى نتائج مبدأ التناظر من أجل سرعة ثابتة في خط مستقيم – ان كلمة تناظر تعني عدم امكانية معرفة اي الرجلين مصيب – وهذه النتيجة هي : عندما اتحدث عما يجري في العالم « الان » فان هذا لايعني شيئا . فاذا كنتم تتحركون بسرعة ثابتة في خط مستقيم فان ما يبدو لكم حادثا

في وقت واحد لا يبدولي انا حادثا في وقت واحد حتى ولو كنا في حالة تقابل معا عندما يحدث الحادثان المتواقتان . ولا يمكن ان نتفق على معنى كلمة « الان » عن بعد . وهذا يستدعي تغييرا عميقا في مفهومي المكان والزمان لدينا ، اذا اردنا الاحتفاظ بمبدأ أن سرعة ثابتة في خط مستقيم لايمكن اكتشافها . والذي يحدث هنا ، في الواقع ، هو أن الحادثين اللذين يبدوان ، لراصد ما ، متواقتين يبدوان لراصد آخر مفصولين في الزمان ؛ ومن المفهوم ضمنيا أن الراصدين بعيدان أحدهما عن الآخر .

وهكذا ترون أن هذا يشبه كثيرا قصة **س** و **ع** في المكان . فاذا كنت في مواجهة الجمهور فان ضلعي المنبر الذي أقف عليه يبدوان في مستوى واحد . فلهما **س** واحد لكن **ع** تختلف من ضلع لاخر . لكنني اذا درت ٩٠ درجة ثم نظرت الى نفس الجدران من نقطة أخرى سأرى أحدهما في مواجهتي والآخر ورائي وسيختلف **س**َ من احدهما للاخر . وعلى نفس المنوال يمكن ان نرى أن الحادثين اللذين يبدوان ، من نقطة ما ، متواقتين (لهما نفس الزمن **ز**) يمكن أن يبدوا من نقطة أخرى منفصلين في الزمان (يختلف **ز**َ من أحدهما للآخر) . لدينا اذن عموما التدوير ذو البعدين ، المكان والزمان ، الذي تكلمت عنه ؛ وهذا يجعلنا نحصل ، باضافة الزمان الى المكان ، على عالم ذي أربعة أبعاد . وليس هذا مجرد اضافة مصطنعة كما يمكن أن يتراءى في غالبية كتب التبسيط التي تقول : « أضيفوا الزمان الى المكان لانكم لاتستطيعون تعيين موضع نقطة فقط في المكان » . ان هذا صحيح لكنه غير كاف للحصول على مكان ــ زمان حقيقي ذي أربعة أبعاد . ولايفعل أكثر من وضع شيئين معا . وللمكان الحقيقي ، بمعنى ما ، خاصية وجوده بشكل مستقل عن كل وجهة نظر خاصة ؛ وعندما ننظر اليه من زوايا مختلفة يمكن أن يحدث اختلاط بين مفهومي « أمام ــ وراء » و « يسار ــ يمين » . وبنفس الصورة يمكن لكمية من الزمان « مستقبل ــ ماضي » أن تختلط بكمية من المكان . فالمكان والزمان مترابطان بشكل وثيق . وبعد هذا الاكتشاف تمكن منكوفسكي من القول : « ان المكان بذاته والزمان بذاته سيتلاشيان كالدخان ، أما ماسيبقى فمزيج منهما معا . »

وأود أن ألح بصورة خاصة على هذا المثال لانه يشكل أساسا لدراسة التناظر في قوانين الفيزياء . وإلى بوانكاريه تعود فكرة تحليل ما يمكن أن نفعل في معادلة دون أن نغيرها ، وهو أول من لفت النظر الى تناظر القوانين الفيزيائية . ولئن كان تناظر الانسحاب في المكان والانسحاب في الزمان لايقود الى نتائج مهمة فان تناظر السرعة الثابتة في خطمستقيم مهم جدا وله نتائج من كل نوع . وهذه النتائج تنطبق ، فوق ذلك ، على قوانين لانعرفها . فاذا فرضنا مثلا ان هذا المبدأ صحيح في تفكك الميزون مو امكن أن نؤكد ان هذه الميزونات لاتسمح لنا بأن نقول بأية سرعة نتحرك ونحن في مركبة فضائية ؛ وهكذا نعرف ، على الاقل ، شيئا ما عن تفكك الميزون مو حتى ولو كنا في البدء نجهل سبب تفككه .

هذا ويوجد تناظرات كثيرة أخرى ، بعضها من نوع خاص جدا . ولن أذكر سوى بضعة منها . وهذا ، مثلا ، أحدها : يمكن أن نبدل ذرة بذرة أخرى من نفس النوع. وهذا لا يغير شيئا في الحوادث مهما كانت . وربما تسألون : « ماذا يعني نفس النوع ؟ » ولايمكن أن أجيب بسوى : « هذا يعني أن الذرة التي توضع مكان الاولى لاتولد أي اختلاف ! » ستفكرون حتما أن الفيزيائيين لايقولون سوى هراء ! أليس كذلك ؟ اذ يوجد انواع عديدة من الذرات واذا بدلنا ذرة بذرة من نوع آخر فان هذا الابدال يغير شيئا ولكن اذا بدلنا ذرة بأخرى من نفس النوع لايتغير شيء ، ان هذا يشبه تعريفا ذا حلقة مفرغة .

لكن المعنى الحقيقي لكل ذلك هو انه يوجد ذرات من نوع واحد ، ويمكن تقسيم الذرات الى مجموعات وأصناف بحيث يمكن أن نبذل ذرة بأخرى من نفس النوع دون أن يغير ذلك شيئا . ولما كان عدد الذرات الموجودة في قطعة صغيرة جدا يتألف من الرقم ١ متبوعا بقرابة ٢٣ صفرا فمن اللازم أن تكون كلها متشابهة لامختلفة . وانه لشيء يلفت النظر حقا أن نتمكن من تصنيفها في عدد محدود ، بضع مئات ، من الانواع المختلفة . فالقول بأنه « يمكن ابدال ذرة بأخرى من نفس النوع » له اذن معنى كبير ، خصوصا في ميكانيك الكم ، ولكن يستحيل علي

ان اشرحه هنا ، والسبب ، الى حدما ، ولكن فقط الى حدما ، يعود الى ان هذا الدرس يلقي أمام جمهور ليس له معرفة كافية بالرياضيات. وهذا الشرح هو ، على كل حال ، دقيق بعض الشيء على الفهم . فللجملة « يمكن ابدال ذرة بأخرى من نفس النوع » في ميكانيك الكم نتائج مدهشة . فهي تؤدي الى حوادث خاصة في الهليوم السائل ، هذا السائل الذي يجري في الانابيب دون مقاومة الى ما شاء الله . والواقع انها تشكل حجر الاساس في كامل الجدول الدوري للعناصر وهي السبب الذي يمنعني من الغوص في ارض الغرفة . وانا لن ادخل في التفاصيل وكل ما اريده هو الالحاح على أهمية هذه المبادىء .

والآن اظنكم قد اقتنعتم أن جميع قوانين الفيزياء متناظرة ازاء اي تأثير او تحوير . واذن سأعمد الآن الى ذكر أشياء من هذا القبيل ليست صحيحة .

واول شيء هو تغيير السلّم . فاذا صنعت جهازا ثم جهازا آخر يماثله تماما في جميع تفاصيله والمواد المصنوع منها لكنه اكبر بمرتين فليس من الصحيح انهما سيعملان تماما بصورة واحدة . وانتم ، وقد تعودتم على الذرات ، تدركون هذا الواقع : فانا لو صنعت هذا الجهاز اصغر بعشرة مليارات مرة فلن يحتوي على أكثر من خمس أو ست ذرات، ولايمكن ان اصنع آلة (مثلا) من خمس ذرات فقط .

هذا وواضح جدا ، عندما نذهب الى هذا الحد ، أنه لايمكننا ان نغير السلّم . وحتى قبل أن تتضح الصورة المتكاملة للذرة كان واضحا ان هذا القانون لم يكن صحيحا . ولابد انكم قرأتم ذات يوم في الجرائد ان شخصا قد انشأ كاتدرائية من عيدان الثقاب ــ عدة طوابق وطراز قوطي اكثر من اية كاتدرائية قوطية اخرى وابهى زينة . لكن لماذا لايبني الناس كاتدرائيات عملاقة ذات عوارض كبيرة ومزينة بنعومة كقطعة الحلوى بأدق تفاصيلها ؟ السبب في ذلك اننا لوبنينا مثل هذه الكاتدرائية لانهارت تحت وطأة علوها وثقلها . لكن هل نسينا شيئا ؟ بالتأكيد : لقد غاب عنا انه يجب ان نغير السلم في كل شيء . فالكاتدرائية المبنية

من عيدان الثقاب تنجذب نحو الارض ، واذا اردنا مقارنتها بالكاتدرائية العملاقة ، المنجذبة أيضا نحو الارض ، وجب أن نكبر الارض أيضا . لكن حظنا هنا أيضا ليس اسعد ! فأرض أكبر من ارضنا ينجم عنها قوة جذب أشد من ثقلنا ، وسيكون حظ الكاتدرائية الحجرية من الانهيار اكثر تأكيدا !

لقد كان غاليله أول من اكتشف ان قوانين الفيزياء لاتبقى كما هي ازاء تغيير السلّم : وذلك عندما قارن قوة أغصان الشجر بقوة العظام . فكان يقول بأننا اذا أردنا ان نصنع عظما لحيوان اكبر — ولنقل أعلى واطول واعرض بمرتين — لوجب أن يحمل وزنا أكبر بثمان مرات ويجب، بالتالي ، على قوة تحمله أن تكون اكبر بثمان مرات . وبما ان مقاومة العظم تتناسب مع سطح مقطعه العرضاني وبما أن طوله سيكون اكبر بمرتين ، فان سطح مقطعه لن يزداد باكثر من اربع مرات .

وقد رسم غاليله في كتابه ، **حوار حول علمين جديدين** ، عظاما وهمية لكلب عملاق لدرجة هائلة . ولا بد أنه كان يعتقد أن اكتشافه لحقيقة أن قوانين الطبيعة ليست ثابتة ازاء تغيير السلم لا يقل اهمية عن اكتشاف قوانين الحركة بدليل أنهما واردان كلاهما معا في كتابه المذكور .

واليكم مثالا آخر على شيء لا يشكل قانون تناظر : اذا راحت مركبتكم الفضائية تدور حول نفسها بسرعة زاوية ثابتة فمن الخطأ القول انكم لن تشعروا بهذا الدوران . بل ستشعرون ، ويمكن أن أقول انكم ستصابون بدوار الماشية[1] ؛ وسترون أيضا أن الاشياء تنقذف نحو جدار المركبة بالقوة النابذة (أو سموها كما تريدون — آمل أن لا يوجد بين الجمهور من يعارضني من معلمي السنة الاولى — فيزياء !) . يمكن ان نبرهن على أن الارض تدور وذلك بواسطة نواس او جيروسكوب ، ولا شك أنكم تعرفون أن كثيرا من المراصد والمتاحف تملك نواسات تدعى نواسات

---

(١) داء يصيب الغنم والبقر يجعل الحيوان يدور في مكانه بحركات تشنجية . (المترجم)

فوكو[1] تشعر بأن الارض تدور ، دونما حاجة لرصد النجوم . فنحن اذن يمكننا أن نؤكد أن الارض تدور بنا بسرعة زاوية ثابتة ، ولا حاجة بنا ، كي نؤكد ذلك ، الى التطلع نحو خارج الارض بل اننا نستطيع ذلك لمجرد أن قوانين الفيزياء تتغير بسبب الحركة الدورانية .

لقد عرض بعض النـاس افتراضا يقول بأننا ، بالرغم من دوران الارض بالنسبة للمجرات ، لو دورنا المجرات أيضا لما تغيرت القوانين .

لست ادري ما قد يحدث لو دورنا العالم بأكمله ، ولكن الذي ادريه اننا لا نملك وسائل الحسم في هذا الموضوع ؛ لا وليس لدينا اليوم نظرية تعين تأثير المجرات على اشيائنا في هذه الدنيا وتؤكد لنا بدقة ودون انخداع ولا مواربة ان العطالة ازاء التدوير ، وتأثير الدوران ، وتقعر سطح الماء في سطل يدور حول محوره ، وكل هذا ، ناتج عن قوة آتية من الاجرام المحيطة . ولا علم لنا ان كان ذلك صحيحا . ان مبدأ ماخ يؤكد ذلك ولكن لم يبرهن عليه بعد . فالمسألة التجريبية المباشرة تتلخص في معرفـة اذا كنا سنشعر بتأثيرات الدوران بسرعة ثابتة بالنسبة للسدم. والجواب هو نعم . ولو تحركنا في مركبة فضائية بسرعة ثابتة في خط مستقيم بالنسبة للسدم فهل نشعر بتأثير ذلك ؟ والجواب هو كلا . انهما أمران مختلفان . ولا يمكن القول بأن كل حركة هي حركة نسبية . وليس هذا معنى النسبية . ومبدأ النسبية يقول بأن السرعة الثابتة في خط مستقيم بالنسبة للسدم شيء لا يمكن كشفه .

والآن اريد أن اتحدث اليكم عن قانون تناظر آخر مهم بحد ذاته وبقصته . انه مسألة الانعكاس في المكان ؛ واليكم الشرح : أصنع جهازا ، وليكن ميقاتية وفي مواجهتها أصنع ميقاتية أخرى هي خيال ــ مرآتي[2]

---

(1) جان برنارليون فوكو ، ١٨١٩ ــ ١٨٦٨ فيزيائي فرنسي .

(2) المقصود بجملة « خيال ــ مرآتي » لشيء ما هو خيال هذا الشيء كما يرى في مرآة مستوية ، والمعلوم ان يسار الخيال هذا هو يمين الشيء نفسه والعكس بالعكس . فالعلاقة بين الشيء وخياله ــ المرآتي هو انقلاب اليمين الى يسار واليسار الى يمين . (المترجم)

للميقاتية الاولى . فالتشابه بين الميقاتيتين هو من جنس التشابه بين قفازين ، احدهما يمين والآخر يسار ، لشخص واحد . فعقارب احدى الميقاتيتين تدور في عكس اتجـاه دوران عقارب الاخرى . ولو دورت مفتاح احداهما في اتجاه ما ، لكي أعبئها ، وجب أن ادور مفتاح تعبئة الاخرى في الاتجاه المعاكس . . . وهكذا . لأعبىء الآن الميقاتيتين ولأضعهما متفقتين على ساعة واحدة ، ثم أتركهما وشأنهما . فهل تبقيان دوما على وفاق ؟

هل تعمل آلة احدى الميقاتيتين بصورة مطابقة لما يجري في الميقاتية الخيال – المرآتي الاخرى ؟ لا أدري ما هو رايكم في الجواب على هـذا السؤال . الارجح أنكم ستردون بالايجاب . وهذا ما فعله أكثر الناس . وانا لا أناقش مسألة جغرافية . ففي الجغرافيـا يمكن أن نميز اليمين واليسار : فلو كنا في فلوريدا واتجهنا باتجاه نيويورك لأمكن أن نقول ان المحيط الأطلسي على اليمين . وبذلك نميز اليمين واليسار ؛ ولو كانت الميقاتية تستعمل ماء البحر فلن تعمل اذا كان انشاؤها قد تم في الجهة المعاكسة لأن آلية عملها ليست موجودة في هذا الماء . وفي حالة كهذه يجب أن نتصور أن جغرافية الارض قد انقلبت من أجل الميقاتية الاخرى؛ وكل ما يدخل في هـذا الحادث يجب أن ينقلب . ونحن لا نهتم ايضا بالتاريخ . لو أخذتم برغيا من الورشة فمن الارجح ان يكون لولبه دائرا نحو اليمين ؛ ويمكن أن نؤكد ان الميقاتية الاخرى ليست مطابقة للاولى لاننا نجد عناء في ايجاد البراغي الملائمة . لكن ذلك يتوقف فقط على نوع الاشياء التي نصنعها . وعلى كل حال فالانطباع الاول هو ، بلاشك ، أن الميقاتيتين تبقيان على وفاق .

والواقع ان قوانين التثاقل تتصف بانهـا لاتتسبب في اي فرق بـين الميقاتيتين اذا كانتا تعملان بالتثاقـل . كما أن قوانـين الكهرباء والمغنطيسية تتصف بأن الميقاتية المقابلة تعمـل جيدا حتى ولو كانت تحوي ، بالاضافة الى أعضائها الكهربائية والمغطيسية ، تيارات واسلاكا واشياء أخرى . ولو كان يدخل في عملها تفاعلات نووية عادية فان هذا

لن يغير شيئا ايضا . لكن يوجد شيء آخر يمكن أن يحدث تغييرا ؛ وسأعود اليه بعد قليل .

ربما كنتم تعلمون ان من الممكن قياس تركيز السكر المحلول في الماء بامرار حزمة من الضوء المستقطب في المحلول . نمرر حزمة من الضوء العادي خلال صفيحة مصنوعة من مادة شفافة خاصة مقطبة للضوء (نسميها المقطب) فيخرج منها الضوء مستقطبا في منحى معين (أي أن الاهتزازة الضوئيةتأخذ منحى معينا عموديا على استقامةالاشعة الضوئية) ثم نرسل هذا الضوء في المحلول وبعد خروجه نضع في طريقه صفيحة مقطبة ثانية تماثل الاولى (ونسميها المحلل) فنرى أن الضوء الخارج من المحلل قد ضعف نوره ولكي نعيد هذا النور الى شدته الاولى يجب ان ندور المحلل ، حول استقامة الاشعة الضوئية ، نحو اليمين (بالنسبة لشخص ينظر باتجاه جهة تقدم الضوء) . نعيد الآن المحلل الى وضعه السابق ونحتفظ بهذا التركيب التجريبي على ما هو عليه ولكننا نأتي بالضوء من الجهة المقابلة ، فيخترق المحلل أولا (ويلعب عندئذ دور مقطب) ثم المحلول ثم المقطب (ويلعب عندئذ دور محلل) فنرى أن النور يخرج ضعيفا من جديد ولكي نعيده الى شدته الاولى يجب أن ندور المحلل ايضا الى اليمين (وهذا بيت القصيد) . يوجد اذن هنا فرق بين اليمين واليسار (لان الانقلاب في جهة حركة الضوء لم يؤد الى انقلاب في جهة تدوير المحلل[1]) .

يمكن ان نستعمل محلول السكر والضوء في تجربة الميقاتيتين ؛ فناخذ وعاء المحلول ونمرر فيه الضوء ثم ندور الصفيحة المقطبة الثانية بحيث يمر الضوء تماما ، ثم نضع التركيب الآخر في الميقاتية الثانية آملين في ان تدور الاهتزازة الضوئية نحو اليسار . لكنها لا تفعل ذلك وتدور دوما نحو اليمين ولا يخترق الضوء المقطب . وهكذا نكون ، بالماءالسكري، قد ولدنا فرقا بين الميقاتيتين !

---

(١) ان شرح هذه التجربة في النص الاصلي موجز ، في رأينا ، اكثر من اللازم . ولذا عمدنا الى كثير من الاضافات وبعض التحوير آملين أن يصبح النص اسهل فهما . (المترجم)

ان هذا يلفت النظر وكأنه يؤكد أن القوانين الفيزيائية ليست تناظرية لدى الانعكاس . ومع ذلك ، فالسكر المستعمل هنا يمكن أن يكون سكر الشمندر . لكن السكر جسم جزيئاته الكيميائيـة ذات شكل بسيط نسبيا . ومن الممكن استحضاره في المخبر انطلاقا من ثاني أوكسيد الفحم والماء ومرورا بعدة مراحل . ولو أخذتم سكرا مستحضرا ، وهو يبدو كيميائيا مماثلا تماما للسكر الطبيعي ، لرايتم أنه لا يحرف الاهتزازة الضوئية . هذا وان الجراثيم تأكل السكر . فلو وضعتم الجراثيم في محلول سكر مستحضر في الماء لأكلت هذه الجراثيم نصف كمية السكر في المحلول . فلو امررتم بعدئذ الضوء المستقطب فيما تبقى من المحلول لاكتشفتم أن هذا المحلول قد عاد يحرف الاهتزازة الضوئية ولكن نحو **اليسار** . واليكم التفسير : ان السكر جزيء معقد يتألف من مجموعة من الذرات مرتبة بشكل متشابك . فلو صنعنا ترتيبا مماثلا تماما ولكن بابدال اليمين يسارا وبالاحتفاظ بالمسافات فيما بين الذرات(١) ، فان طاقة الجزيء لا تتغير ، ولا تتغير أيضا جميع الظواهر الكيميائية التي لا تخص الحياة . لكن المخلوقات الحية تشعر بهذا الفرق ، والجراثيم لا تأكل سوى نوع واحد من السكر وتدع الآخر . والسكر المستخرج من الشمندر يحتوي على نوع واحد هو الجزيئات اليمينية فقط ، ولذا فهو يحرف استقطاب الضوء نحو اليمين . والجراثيم لا تأكل الا الجزيئات اليمينية . ونحن عندما نستحضر السكر كيميائيا بدءا من مواد هي نفسها ليست ذات تناظر نحصل على نوعي الجزيئات معا وبكميتين متساويتين تماما ؛ واذا ادخلنا الجراثيم في السكر المستحضر هذا فانها تأكل النوع الذي هي قادرة على أكله وتترك النوع الآخر . ذلك هو السبب الذي يجعل السكر المتبقي في المحلول ، اي الذي لم تأكله الجراثيم ، يحرف استقطاب الضوء نحو الجهة الاخرى . هذا ويمكن فصل النوعين عن بعضهما بمشاهدة البلورات في المجهر ، كما اكتشف باستور(٢) . اذ يمكن

---

(١) أي أن هذا الترتيب هو بالضبط خيال الترتيب الاول في مرآة مستوية .
(المترجم)

(٢) لويس باستور ، ١٨٢٢ – ١٨٩٢ ، عالم جراثيم فرنسي .

ان نثبت ان لكل ذلك مغزى ويمكن أن نفصل نوعي السكر بأنفسنا اذا شئنا دون ان ننتظر الجراثيم . لكن المهم هو أن الجراثيم **تستطيع** ذلك . فهل معنى هذا أن حوادث الحياة لا تخضع للقوانين نفسها ؟ الظاهر كلا . ويبدو ان المخلوقات الحية تتألف من كميات من الجزيئات المعقدة التي لها كلها نوع من « اللولبية » . والبروتينات هي من أولئك الجزيئات الاكثر تمثيلا لهذه المخلوقات الحية ، وهي تشبه اللولب المستعمل في فتح سدادة الزجاجة ، ولها جهة لولبة معينة تماما تدور نحو اليمين . ولو استطعنا ان نستحضر كيميائيا جزيئات مماثلة ولكنها ملولبة نحو اليسار بدلا من اليمين فلن تكون فعالة بيولوجياً لانهـا لن تنسجم مع جزيئات البروتـين الاخرى . فاللولبية اليساريـة تنسجم مع لولبية يسارية اخرى . لكن اليسار واليمين لا ينسجمان . والجراثيم لهـا لولبية يمينية في تركيبهـا الكيميائي وتستطيع بذلك أن تتبين السكر اليميني من السكر اليساري .

لكنها كيف تتوصل الى ذلك ؟ ان الفيزياء والكيمياء لا تستطيعان تمييز الجزيئات ولا تصنعان الا النوعين معا . لكن البيولوجيا يمكنها ذلك . والتفسير ، السهل التصديق ، هو أنه ، في الازمان السحيقة في بدء الحياة ، كان قد تشكل جزيء واحد بالصدفة وراح يتكاثر ويتوالد خلال سنين وسنين حتى أن هذه اللفائف اللزجة ذات الزوائد الموشاة بنقاط تجتمع لتثرثر بعضا في مواجهة بعض . ولسنا ، نحن ، سوى انسال الجزيئات الاولى وهي انما تشكلت بمحض الصدفة في احدى الجهتين دون الاخرى ، اذ كان لا بد من أن تتشكل في هذه الجهة أو تلك ، يمينا أو يسارا ؛ ثم بدأت بالتكاثر وما زالت مستمرة فيه حتى الآن . وهذا يشبه جدا براغي الورشات ؛ فقد أستعملت براغي ملولبة نحو اليمين وهكذا دواليك . هـذا وان كون جميع جزيئات المخلوقات الحية ملولبة باتجاه واحد لهو دليل من أعمق الادلة على رتابة تاريخ الحياة في نسق واحد منذ المرحلة الجزيئية المحضة .

ولاعطاء صورة أوضح عن هذه القضية ، قضية فيما اذا كانت قوانين الفيزياء لا تميز بين اليمين واليسار ، يمكن ان نطرح المسألة التالية :

لنفترض اننا نتحدث هاتفيا مع مريخي (احد سكان كوكب المريخ) أو مع اكتوري(١) واننا نريد ان نصف له ما يوجد على كوكب الارض .

كيف يمكن ، باديء ذي بدء ، أن يفهم كلماتنا ؟ لقد درس الاستاذ موريسون ، من جامعة كورنيل ، هذه المسألة بعمق ورأى ان نبدأ بالقول: « تاك ، واحد ؛ تاك ، تاك ، اثنان ؛ تاك ، تاك ، تاك ثلاثة » وهكذا دواليك. ولن يطول بصاحبنا الامر حتى يتفهم اعدادنا ؛ وبعد ان يفهم كلمات اعدادنا يمكن أن نكتب سلسلة اعداد تمثل الاوزان والاوزان النسبية لمختلف الذرات بالتتابع ؛ ثم نقول : « هدروجين ، ١٫٠٠٨ » ثم الدوتريوم ، ثم الهليوم ... الخ . وهو ، بعد أن يعكف على هذه الاعداد زمنا ما ، يكتشف أن النسب الرياضيــة هي نسب أوزان العناصر الكيميائيــة البسيطة . وبهذه الطريقة يمكن تدريجيا ان نؤلف معه لغة مشتركة . وهنا الآن تبدأ المشكلة . لنفترض ، بعد أن تعارفنا ، انه قال : « انكم قوم جذابون واحب أن أعرف ماذا تشبهون » . فنبدأ : « ان طولنا قريب من ١٫٨٠ مترا » فيسأل : « ١٫٨٠ مترا ؛ ما هو كبر المتر ؟ » وجوابنا بسيط : « ١٫٨٠ مترا يساوي ارتفــاع سبعة عشــر الف مليون ذرة هدروجين ! » . ان هذا ليس مزاحا — بل طريقة لوصف ١٫٨٠ مترا لمخلوق ليس لديه مجموعة مقاييس — وبفرض اننا لا يمكن أن نرسل اليه عيّنة ولا يمكن أن ننظر واياه معا الى أشياء واحدة . وهكذا يمكننا أن نشرح له حجمنا . ذلك لان قوانين الفيزياء ليست لامتغيرة بتغير السلّم ويمكن أن نستعمل هذا الواقع لتعيين السلم . ثم نستمر في وصف انفسنا — ارتفاعنا ١٫٨٠ مترا ، متناظرون خارجيا في الجهتين ، وكيت وكيت ، عددا بعد عدد ... الخ . وعندئذ سيقول : « هذا جميل جدا ولكن ماذا تشبهون داخليا ؟ » فنروح نصف له القلب وباقي الاعضاء ثم نقول : « ضع الآن القلب في جهة اليسـار » ولكن كيف نشرح له أين توجد جهة اليسـار ؟ — لا بد انكم ستقترحون أن نقول له : « خذ سكر الشمندر وضعه في الماء ثم افعل كذا ... وسترى كذا ... » ، لكن المزعج الوحيد هو انه لا يوجد شمندر هناك ؛ وحتى لو وجد فنحن لسنا متأكدين من

(١) نسبة الى اكتوروس وهو سادس ألمع النجوم في السماء . (المترجم)

ان صدف التطور على المريخ ، ان كانت قد صنعت بروتينات كما صنعت عندنا ، لم تخلق بروتيناتها ملولبة في الاتجاه المعاكس، مما يجعل اقتراحكم عديم الفائدة . وبعد تفكير وعناء طويلين سترون أنكم لن تستطيعوا أن تشرحوا له جهة اليسار ، وتدركون عندئذ ان ذلك مستحيل .

ومع ذلك فمنذ سنوات خمس جاءت تجارب اثارت مشاكل من كل نوع . وانا لن ادخل في تفاصيلها ولكننا وجدنا انفسنا غارقين في صعوبات تتزايد حدتها ، ومواقف اعجب فاعجب ؛ حتى جاء أخيرا لي ويانغ[1] فاصدرا فرضية ان مبدأ التناظر ، يمينا – يسارا (أن الطبيعة لا تميز اليمين عن اليسار) مبدأ خاطىء ؛ وهذه الفرضية تسمح بتفسير عدد من الامور العجيبة . وقد اقترح لي ويانغ تجارب مباشرة لاثبات ذلك . ولن أتكلم الا عن أكثرها مباشرة . نأخذ تفككا اشعاعيا ، مثلا ، يحدث فيه اصدار الكترون ونترينو – وهو مثال تكلمنا عنه يحدث بموجبه تفكك النترون الى بروتون والكترون ونترينو مضاد – ويوجد كثير من حوادث الاشعاع تزداد فيها شحنة النواة بوحدة الشحنات ويصدر الكترون واحد . والمهم في ذلك انكم اذا قستم « سبين » الالكترون (وهو يعبر عن كيفية انفتال الالكترونات حول نفسها لحظة خروجها) فسوف تكتشفون انها تفتل حول نفسها نحو اليسار (عندما تنظرون اليها من الخلف ، اي : اذا كانت تذهب نحو الجنوب تكون دائرة حول نفسها كجهة دوران الارض حول نفسها) . ولهذه الظاهرة معنى دقيق جدا وهو أن الالكترون الصادر عن التفكك يفتل دوما في اتجاه واحد وأن لولبيته يسارية . فكأن انبوب البندقية التي تطلق الالكترون ، في هذا التفكك المسمى اصدار بيتا ، محزوز داخليا بشكل لولبي يساري . وعلى هذا الاساس يمكن ان ننادي صديقنا المريخي الى الهاتف لنقول له : « اسمع ، خذ مادة مشعة ، نترونا وارصد الالكترون الذي يخرج بالاصدار بيتا . فاذا انقذف نحو الاعلى عند خروجه فان جهة انفتال سبينه هي التي نسميها جهة اليسار بالنسبة للجسم المشع منظورا اليه من الخلف . ذلك هو تعريف اليسار . وفي هذه الجهة يوجد القلب في

---

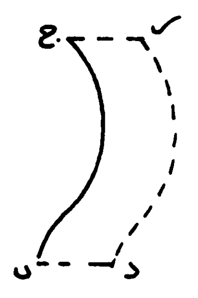
(١) تسونغ داولي وشن نينغ ، فيزيائيان صينيان ، جائزة نوبل ١٩٥٧ .

جسمنا » . وهكذا يمكن اذن أن نعرّف اليمين واليسار وبذلك ينهار القانون القائل بأن العالم متناظر يمينا ـ يسارا .

أريد بعدئذ أن أتكلم عن العلاقة بين قوانين الانحفاظ وقوانين التناظر. وقد تكلمنا في المحاضرة السابقة عن مبادىء الانحفاظ ، كانحفاظ الطاقة والاندفاع والعزم الزاوي ... الخ . ويبدو ، وهذا أمر مهم جدا ، انه يوجد علاقة عميقة بين قوانين الانحفاظ وقوانين التناظر . وهذه العلاقة لا تتفسر جيدا ، بحسب ما نعلم اليوم على الاقل ، الا بمعرفة ميكانيك الكم . وسأعطيكم رغم ذلك ايضاحا .

اذا قبلنا أن قوانين الفيزياء يمكن شرحها بواسطة مبدأ الاصغرية نستطيع عندئذ أن نبرهن على انه اذا كان قانون يتلاءم مع امكانية سحب مجمل التركيب ، أو بتعبير آخر اذا كان القانون قابلا للانسحاب في المكان ، فيجب أن يكون هناك انحفاظ للاندفاع ، فهناك علاقة وثيقة بين مبادىء التناظر وقوانين الانحفاظ . لكن هذا يستدعي أن نقبل بمبدأ الاصغرية . وفي محاضرتي الثانية ناقشت طريقة، لوصف القوانين الفيزيائية، تستند الى أن الجسيم يذهب من نقطة لأخرى خلال فترة زمنية معينة بتحري شتى الطرق . ويوجد كمية معينة تسمى ، ربما خطأ ، فعل . فاذا حسبنا الفعل على شتى الطرق اكتشفنا ان الفعل هو دوما أصغر على الطريق الذي يسلكه الجسيم فعلا منه على اي طريق آخر . وهذه الطريقة في شرح القوانين تتلخص بالقول بأن الفعل ، المحسوب من دساتير رياضية معينة ، هو أقل على الطريق الفعلي منه على اي طريق ممكن آخر . وطريقة أخرى لقول أن الفعل أصغري هي القول بانه اذا غيرنا الطريق قليلا جدا فان ذلك لن يحدث فرقا يذكر . تصوروا انكم تتنزهون على هضبة ـ لكن الهضبة ذات سفح قليل الميل ، لان الكائنات الرياضية التي نحن بصددها تتعلق بميل قليل ـ وانكم تصلون الى المكان الاخفض ؛ وأنا أزعم انكم اذا خطوتم خطوة صغيرة الى الامام فلن يتغير ارتفاعكم ؛ كما أن خطوة صغيرة انطلاقا من أعلى نقطة لا تغير ، لاول وهلة ، شيئا من ارتفاعكم . لكن ، في مقابل ذلك ، اذا كنتم على السفح فان خطوة واحدة

قد ترتفع بكم او تنخفض ، وهنا مفتاح الفكرة القائلة بأن خطوتكم الصغيرة المنطلقة من أخفض مكان لا تحدث تغييراً يذكر ، لانه لو حدث فرق فان خطوة تخطونها بالاتجاه المعاكس ستنخفض بكم ، وبما انكم موجودون في النقطة الاخفض فلا مجال للنزول اكثر . وهذا ما يؤكد لكم ، كتقريب أولي ، أن الخطوة لاتحدث أي فرق . وهكذا تدركون ان انحرافا طفيفا عن الطريق الفعلي الذي يسلكه الجسيم لايغير الفعـل بتقريب أولي . لنرسم طريقا يذهب من **ب** الى **ج** (شكل ٢٥) . ولنعتبر الطريق الآخر الممكن التالي : نقفز اولا الى نقطة قريبة جـدا **د** ثم نتبع طريقا موازيا تماما حتى نقطة أخرى **ر** . وبما انه طريق مواز فسيكون بالطبع منسحبا عن الطريق الفعلي بنفس المسافة . لكننا كنا قد اكتشفنا أن قوانين الطبيعة تنص على ان الكمية الكلية للفعل المصروف على الطريق **ب د ر ج** تساوي ، بتقريب أولي ، الفعل المصروف على الطريق **ب ج**



شكل ٢٥

اي ، بموجب مبدأ الأصغرية ، على طريق الحركة الفعلية . واضيف أن الفعل على الطريق الاول ، من **ب** الى **ج** ، هو الفعل نفسه من **د** الى **ر** اذا كان العالم بقي على حاله عندما نسحب كل شيء لان الفرق الوحيد بين هذين الفعلين هو انسحاب اجمالي . فاذا كان ، اذن ، مبدأ التناظر بالانسحاب في المكان صحيحا فان الفعل على الطريق المباشر بين **ب** و **ج** يساوي الفعل على الطريق المباشر بين **ب** و **ر** . على ان الفعل الكلي ، عندما توجد حركة حقيقية ، على الطريق اللامباشر **ب د ر ج** هو نفسه ،

تقريبا جدا ، على الطريق المباشر **ب ج** وهو مجموع ثلاثة اجزاء ــ الفعل في الذهاب من **ب** الى **د** ثم من **د** الى **ر** ثم من **ر** الى **ج** .وهكذا تدركون بلاشك أن مجموع الاسهامين من **ب** الى **د** ومن **ر** الى **ج** معدوم . لكن احد هذين الطريقين ، في الحركة ، مسلوك باتجاه والاخر بالاتجاه المعاكس .

فاذا عتبرنا ان الاسهام ، من **ب** الى **د** ، هو مفعول الحركة في أحد الاتجاهين وان الاسهام من **ر** الى **ج** هو اسهام من **ج** الى **ر** ذو اشارة معاكسة لانه يحدث في الاتجاه المعاكس ، فان كل ذلك يعني انه يوجد كمية فعل من **ب** الى **د** يجب ان تتعلق بالكميــة من **ج** الى **ر** ، لكي يحدث الانعدال المطلوب . ذلك هو تأثير الخطوة الصغيرة ، في اتجاه **ج ر** ، على الفعل .

ان هذه الكمية ، اي تأثر الفعل بخطوة صغيرة الى اليمين هي في البدء (من **ب** الى **د**) وفي النهاية (من **ج** الى **ر**) . يوجد اذن كمية لاتتغير في الزمان شريطة ان يعمل مبدأ الاصغرية وان يصح مبدأ التناظر بالانسحاب المكاني . وهذه الكمية اللامتغيرة (تأثر الفعل بخطوة جانبية) هي ، في الواقع وبالذات ، الاندفاع الذي تكلمنا عنه في المحاضرة السابقة . وهذا ما يثبت العلاقة بين قوانين التناظر وقوانين الانحفاظ عندما نقبل أن القوانين تطيع مبدأ الفعل الاصغري . ومن الثابت انها تطيع مبدأ الفعل الاصغري لانها متولدة من ميكانيك الكم . ولهذا السبب قلت ان العلاقة بين قوانين التناظر وقوانين الانحفاظ تتولد ، في النهاية ، من ميكانيك الكم . هذا وبمحاكمة مماثلة نحصل من تناظر الانسحاب الزماني على انحفاظ الطاقة . ومن تناظر الانسحاب التدويري في المكان نحصل على انحفاظ العزم الزاوي . اما فكرة أن التناظر الانعكاسي المرآتي لا يولد اي تغيير في الآثار الفيزيائية فيبدو انها لا تتعلق بأية فكرة بسيطة بالمعنى التقليدي . وقد اطلق عليها اسم الزوجية ، ويوجــد قانون انحفاظ يسمى انحفاظ الزوجية ، ولكن ما هي الا اسماء معقدة . واراني مضطرا الى ذكر انحفاظ الزوجية لانكم لا بد قراتم في الصحف أن قانون انحفاظ الزوجية ليس صحيحا . وكان من الممكن أن تفهموا هــذا الاكتشاف بسهولة اكبر لو كتبت الصحف ما يلي : لقد ثبت أن المبدأ الذي يقول بعدم وجود فرق بين اليمين واليسار ليس صحيحا .

وما دامت بصدد التناظر اود ان أشير الى بعض المسائل الجديدة . مثلا ، من اجل كل جسيم يوجد جسيم مضاد . فالجسيم المضاد للالكترون هو البوزترون ، ومن أجل البروتون يوجد البروتون المضاد . وعلى هذا الاساس يمكن مبدئيا ان نشكل مادة مضادة تكون فيها كل ذرة مؤلفة من الجسيمات المضادة المقابلة . فذرة الهدروجين تحتوي على بروتون والكترون ؛ ولو أخذنا بروتونا مضادا ، وهو سالب كهربائيا، وبوزترونا ووضعناهما معا نحصل على نوع من ذرة هدروجين هو ذرة هدروجين مضاد . والواقع اننا لم نصنع حتى اليوم ذرات هدروجين مضاد لكننا حسبنا أن ذلك ممكن مبدئيا وان من المستطاع صنع جميع انواع المادة المضادة بهذه الطريقة . وعندها يمكن أن نتساءل اذا كانت المادة المضادة تتصرف كالمادة ؛ والجواب ، حسب معلوماتنا ، هو نعم . فأحد قوانين التناظر يؤكد أننا اذا صنعنا شيئا من المادة المضادة فسوف يتصرف بالاسلوب نفسه الذي يتصرف به الشيء المقابل المصنوع من المادة . ومن المؤكد أن هذين الشيئين اذا التقيا يتفانيان معا وتتفجر شرارات !

ولقد كنا دوما نظن أن المادة وضدها تخضعان لنفس القوانين . ولكن ، ونحن نعلم الآن أن التناظر يمينا ــ يسارا يبدو خاطئا ، ينطرح سؤال هام . اذا اعتبرت تفكك النترون المضاد (وهو يتحول الى بروتون مضاد والكترون مضاد ، وهو البوزترون ، ونترينو) فهل يحدث ذلك في الجهة السابقة نفسها ؟ وبتعبير أوضح هل يخرج البوزترون ملولبا نحو اليسار أو في الاتجاه المضاد ؟ لقد كنا نظن ، حتى بضعة شهور خلت، انه ملولب في الاتجاه المضاد وان المادة المضادة (البوزترون) تختار اليمين عندما تختار المادة (الالكترون) اليسار . وفي هذه الحالة لن نتمكن حقا ان نحدد للمريخي اليمين واليسار ، ذلك لان ما عنده قد يكون ، بالصدفة، مادة مضادة وعندئذ ستكون الكتروناته ، في تجربته ، بوزترونات وتنفتل في الاتجاه السيء ، وسيضع ، نتيجة ذلك القلب في الجهة السيئة (في

جهة اليمين) . لنفترض أنكم تشرحون للمريخي بالهاتف كيف يصنع انسانا ؛ فيصنعه ويسير انسانه على ما يرام . ثم تشرحون له أيضا جميع اعرافنا الاجتماعية . وفي النهاية ، وبعد ان يشرح لنا كيف نبني مركبة فضائية محكمة ، تسافرون لكي تقابلوه ، وعندما تقتربون منه تمدون له اليد اليمنى للمصافحة . فاذا مد لكم يده اليمنى فصافحوه ، ولكن اذا مد يـده اليسرى فحـذار ... أن تمسوه لانكم عندئذ ستفنونـه وسيفنيكم !

واخيرا كان بودي ان احدثكم عن تناظرات اخرى لكن شرحها جم الصعوبة . فهناك تلك الامور المثيرة جدا وهي التناظرات التقريبية . ففي امكانية التميز بين اليمين واليسار جانب هام جدا : ان هذه الامكانية لا تصح الا في التفاعلات الضعيفة كالاصدار بيتا . وهذا يعني أن الطبيعة، في ٩٩ر٩٩٪ ، لا تسمح بالتمييز بين اليمين واليسار ، ولكن يوجد خلوة صغيرة ، حادثة صغيرة معينة ، تختلف عن الباقي تماما . وكأنها ذات ساق واحدة . انها الفوزة لا يدري احد عنها شيئا .



٥

التمييز بين الماضي والمستقبل

من المعلوم ، لدى كل الناس ، أن حوادث الطبيعة هي وضوحا لاعكوسة . نعني أن هذه الحوادث لا يمكن أن تحدث بشكل مقلوب في الزمان . يسقط الفنجان من يدكم فينكسر ، ولو انتظرتم دهرا طويلا لن تروا القطع المتناثرة تتجمع لوحدها وتقفز فنجانا سليما الى يدكم ! وعندما تشاهدون أمواج البحر تتكسر على صخور الشاطىء فانتظروا طويلا ، دون جدوى ، أن تعيشوا اللحظة التي يتجمع فيها الزبد ثانية ويلقي بنفسه في البحر ويسبح مبتعدا عن الشاطىء – لا شك أن المنظر سيكون جميلا جدا !

وقد أصبحت عادة في المحاضرات أن يُعرض بالمقلوب فيلم يصور حوادث مختلفة ، فيثور ضحك عام . وهذا الضحك يدل ببساطة على أن الأمور لا يمكن أن تحدث هكذا في عالم الواقع . وواضح أن هـذه الامثلة أضعف من أن تشكل برهانا على ظاهرة فيها من العمق والبداهية ما في الفرق بين الماضي والمستقبل . فنحن لا حاجة بنا لاجراء تجارب كي نفرق بين الحاضر والمستقبل ، وتكفي لذلك تجارب الحياة الخاصة . فنحن نتذكر الماضي لا المستقبل ، ولدينا حس واضح بالفرق بين ما يمكن أن يحدث وما هو قد حدث فعلا . ومن الناحية النفسانية يوجد فروق بين الماضي والمستقبل تتجلى من خلال احساسات خاصة كالذاكرة أو حرية الاختيار الظاهرية ، بمعنى اننا نعتقد بامكانية التأثير على المستقبل بينما لا يعتقد أحد منا ، الا ما ندر ، بامكانية تغيير الماضي . فالندم والاسف والامل . . . كلها كلمات تميز بين الماضي والمستقبل .

لكن اذا كان العالم الحقيقي مصنوعـا من ذرات وكنا نحن أيضا مصنوعين من ذرات ونخضع لنفس القوانين الفيزيائية فان أبسط تفسير لهذا التفريق البدهي بين الماضي والمستقبل ، لهذه اللاعكوسية في كل الحوادث ، يمكن أن يكمن في أن بعض القوانين ، بعض قوانـين حركة الذرات ، تعين اتجاها يمتاز عن سواه ـ أن بعض الحركات الذرية لا يمكن أن تحدث في الاتجاهين . وقد يجب أن نجـد في الميكانيك مبدأ تتحول بموجبه الآلات دوما الى اجهزة ولا يحدث العكس أبدا ، وبذلك تتحول صفات العالم باستمرار من صفات **آلاتية** الى صفات **جهازية** ، وهذا التحول الوحيد الاتجاه الذي يطرأ على الاشياء هو السبب في سير أمور الطبيعة باتجاه واحد .

لكننا لم نجد شيئا من هذا القبيل حتى الآن . فلا يوجد في قوانين الطبيعة المعروفة حتى اليوم شيئا يسمح بالتمييز بين الماضي والمستقبل، شيئا لا يستدعي اثارة الضحك عندما نرى الفيلم يمر بالمقلوب .

لنأخذ مثالنا المعتاد ، قانون التثاقل . لدي شمس وكوكب . اطلق الكوكب في اتجاه ما فيأخذ بالدوران حول الشمس . أصور ذلك على فيلم ثم أعرض الفيلم بالمقلوب فماذا أرى ؟ سأرى الكوكب يدور حول الشمس ، في الاتجاه المعاكس طبعا ولكنه يرسم اهليجا أيضا . وستكون سرعته أيضا بحيث يمسح نصف القطر مساحات متساويـة في ازمنة متساوية . فالكوكب يتحرك اذن على ما يرام ولا يمكن أن نميز حركته هذه عن الحركة الاصلية . فقانون التثاقل اذن لا يشعر باتجاه الزمن . فلو عرضتم اذن بالمقلوب فيلما يصور حوادث لا يدخل فيها سوى التثاقل سيبدو طبيعيا تماما . وهذا ما يمكن النص عليه بشكل أدق : اذا قلبنا ، مرة واحدة ، سرعة كل من جسيمات جملة ، ولو كانت معقدة ، فان الجملة ترجع على أعقابها متبعة طريقها بالمقلوب . فاذا كان لديكم مجموعة جسيمات تعمل شيئا ما وقلبتم سرعاتها فانها تخرب ما كانت قد فعلته.

وهذا شيء موجود في قانون التثاقل الذي يشرح كيف تتغير السرعة بتأثير القوة : اذا قلبت الزمن لا تتحور القوى ولا تتحور بالتالي تغيرات

السرعات على مسافات مساوية . وهكذا تعاني كل سرعة سلسلة تغيرات هي بالضبط مقلوب السلسلة التي عانتها فيما سبق . وهكذا نبرهن بسهولة على أن قانون التثاقل عكوس في الزمان .

وماذا بشأن قوانين الكهرباء والمغنطيسية ؟ انها عكوسة في الزمان . وقوانين التفاعلات النووية ؟ عكوسة في الزمان حسب معلوماتنا . وقوانين الاصدار بيتا التي تكلمنا عنها ؟ هل هي عكوسة في الزمان أيضا ؟ هناك صعوبات في تجربة حديثة تدل على امكانية وجود شيء ما ، شيء لا تتنبأ به القوانين ويوحي بأن الاصدار بيتا قد لا يكون عكوسا في الزمان ؛ ولكن علينا أن ننتظر تجارب أخرى لتأكيد ذلك(١) . وعلى كل حال يمكن أن نؤكد أن الاصدار بيتا (سواء كان عكوسا في الزمان أم لم يكن) هو ظاهرة ليس لها أية أهمية في أغلب الظروف العادية . فوجودي امامكم وحديثي اليكم يتحققان باعتبارات كيميائية واخرى كهربائية وقليلا بقوى نووية كما يتوقفان على التثاقل ؛ لكن ليس للاصدار بيتا اي دخل في ذلك . فأنا ، بالرغم منه ، اعمل باتجاه واحد : فعندما أتكلم يتطاير صوتي في الهواء ولا يعود ليغوص من جديد في فمي المفتوح . وهذه اللاعكوسية لا شأن للاصدار بيتا بها . وبتعبير آخر نعتقد أن غالبية الظواهر العادية في الطبيعة ، تلك التي تنجم عن حركة الذرات ، تطيع قوانين يمكنها أن تكون مقلوبة تماما في الزمان . وعلينا أن نستمر في البحث عن تفسير اللاعكوسية .

لو نظرنا بانتباه اعمق الى كواكبنا الدائرة حول الشمس لشعرنا سريعا أن ليس كل شيء على ما يرام . فدوران الارض ، مثلا ، حول نفسها يتباطأ شيئا فشيئا ؛ وهذا ناتج عن احتكاك مياه المد والجزر ، وليس الاحتكاك بالطبع شيئا عكوسا ؛ فاذا وضعت على الارض جسما وازنا ودفعته ، فانه يتحرك ثم يتوقف ؛ ولو انتظرت الدهر كله لن أراه ينطلق من جديد فيتسارع ويعود الى يدي . فالاحتكاك اذن يتضح ،

---

(١) ان هذه اللاعكوسية الاساسية (لكن ذات تأثير محدود) قد تم اثباتها تماما في ظواهر من نوع الاصدار بيتا ودرست بعد ١٩٦٤ . (المترجم الفرنسي)

بالفعل ، شيئا لا عكوسا . لكن مفعول الاحتكاك ، كما تعلمون ، ليس سوى نتيجة تعقيد التفاعل بين ذرات الجسم وذرات لوح الخشب ، نتيجة اضطراب ذراتهما . فالحركة الرتيبة للجسم تتحول الى اضطراب غير رتيب لذرات الخشب . علينا اذن أن نفحص الامور بشكل أعمق .

وهنا نمسك ، في الواقع ، بمفتاح هذه اللاعكوسية . واليكم مثالا بسيطا . خـذوا وعاء ذا حجرتين احداهما مملوءة بالماء الملون بالحبر الازرق والاخرى بماء صاف . ولنفترض أن الحجرتين مفصولتان بحاجز رقيق . لنسحب الحاجز بكل بطء وهدوء . ففي البدء يكون السائلان منفصلين : الازرق في جهة والصافي في الجهة الاخرى . وبعد قليل يبدأ السائلان بالاختلاط شيئا فشيئا ؛ وفي النهاية يختلطان تماما في محلول واحـد ذي لون ازرق شاحب يعم الوعاء كله . ولو بقيتم دهرا طويلا تنظرون الى هذا المحلول لما رايتم السائلين ينفصلان من تلقائهما . (يمكن ان تفعلوا شيئا لفصلهما من جديد . كأن تبخرون الماء كله وتكثفونه في وعاء آخر فتحصلون على الملون لوحده ؛ ثم تحلونه من جديد في نصف كمية الماء المتكاثف وتعيدون الجملة الى وضعها الاولي . ولكنكم بهذا العمـل تكونون قد ادخلتم حوادث أخرى لا عكوسـة) . فالسائلان لا يعودان من تلقائهما الى ما كانا عليه .

وهذا يعطينا فكرة . لننظر الى الجزيئات . لنصور ، على فيلم ، الماء الازرق والماء الصافي اثناء تمازجهما . ثم لنعرض هذا الفيلم بالمقلوب فنرى حادثا عجيبـا : سنرى الماء منتظم اللون في البدء ، ثم ينفصل اللونان شيئا فشيئا ؛ انه منظر مجنون تماما . لنكبر الآن جميع الصور ، بحيث يمكن لكل فيزيائي أن يفحصها ذرة ذرة كي يجد الشيء الذي يحدث بشكل لاعكوسي : كي يجد أين ينتهك قانون التكافؤ بين الماضي والمستقبل . لنأخذ اذن بتفحص صور الفيلم . سنرى ذرات من نوعـين مختلفين (نسميهما ، وهذا مضحك ، زرقاء وبيضاء) تضطرب دون توقف في هياجها الحراري . فلو بدانا بالصور الاولى لراينا غالبية الذرات ، التي من لون واحد ، في جهة والغالبية الاخرى في الجهة الاخرى . ثم تضطرب

هذه الذرات كلها في جميع الاتجاهات ، بمليارات ومليارات ؛ ثم ، وبالرغم من ان كل نوع منها كان منفصلا لوحده في جهة ، سنرى أن حركاتها الدائمة الفوضوية تخلطها فيما بينها تماما ، مما يفسر لماذا يصبح الماء في النهاية ذا لون أزرق منتظم .

لنفحص تصادما معينا نختاره على الفيلم : سنرى الذرتين ترتطمان على بعضهما هنا ثم تنزوان الى هناك . لنعرض الآن هذا القسم من الفيلم بالمقلوب : سنرى الذرتين تأتيان من هناك فتتراطمان هنا وتنزوان . وعندها يقوم الفيزيائي ، الذي يفحص الصور بعين يقظة ، ببعض القياسات ويهتف : « رائع ! ان هذا ينسجم مع قوانين الفيزياء : اذا جاءت ذرتان من هناك وتصادمتا فسوف تنزوان فعلا نحو هنا » . ان هذا عكوس . ان قوانين التصادمات الذرية والجزيئية عكوسة .

وهكذا يؤدي الفحص الجاري بعناية فائقة الى موقف عجيب يستغلق على الفهم ؛ لان كل تصادم يحدث بشكل عكوس تماما ، مع ذلك فان الفيلم المعروض بالمقلوب يظهر حادثا مستحيلا : نرى فيه الجزيئات مختلطة تماما في البدء — زرقاء ، بيضاء ، زرقاء ، بيضاء ، زرقاء ، بيضاء — ثم نراها ، بمرور الزمن وبفضل التصادمات ، تنفصل الى ذرات بيضاء في جهة وذرات زرقاء في جهة اخرى . وذلك بالرغم من أن الفحص الدقيق للفيلم بالمقلوب يظهر أن كل التصادمات عكوسة .

وهكذا ترون أن مجرد الفوضى العامة للحياة هي التي تتسبب في اللاعكوسية . فلو انطلقتم من حالة انفصال كامل ثم أدخلتم عليها تغيرات فوضوية تحصلون على تمازج نسيق . لكن اذا انطلقتم من حالة تمازج نسيق وادخلتم تغيرات فوضوية لما حصلتم على انفصال . لكن ربما يحدث انفصال . اذ ليس مما ينتهك قوانين الفيزياء أن تنزو الذرات ، بعد التصادم ، بحيث يحدث الانفصال . لكن هذا نادر الحدوث ، وليس له بذلك اي حظ في مليون عام . وهنا يكمن الجواب . ان الامور تسير بصورة لاعكوسة بمعنى أن أحد الاتجاهين محتمل بينما الاتجاه الآخر ، بالرغم من انه ممكن ومنسجم مع قوانين الفيزياء ، لا يمكن أن يحدث في

مليون عام . فمن المثير للسخرية ان نتوقع رؤية هياج الذرات يقوم بفصل الماء عن الحبر كلا في طرف ولو انتظرنا طويلا .

والآن ، كان بامكاني اجراء تجربتي في علبة صغيرة لا يمكن أن تتسع لاكثر من اربع أو خمس ذرات من كل نوع تختلط ، كما في السابق ، بمرور الزمن . وهنا يمكنكم ، على ما اظن ان تقبلوا أنكم اذا ثابرتم على مراقبة التصادمات الفوضوية المستمرة فقد ترونها بعد زمن ما (ليس لزاما مليون سنة ، ربما سنة واحدة فقط) قد عادت صدفة الى الحالة البدئية بمعنى ، على الاقل ، انني لو وضعت حاجزا في الوسط لرأيتم البيضاء في جهة والزرقاء في الجهـة الاخرى . ان هذا ليس مستحيلا . لكن الأجسام التي نتعامل معها في هـذه الدنيا لا تتألف من اربع أو خمس ذرات بيضاء أو زرقاء ، بل من أربعة أو خمسة مليار مليار مليار مليار ذرة وهي لن تنفصل هكذا ! فخاصية اللاعكوسية الظاهرية للطبيعـة لا تأتي من لاعكوسية القوانين الاساسية الفيزيائية ؛ لكنها تأتي من واقع أنكم اذا انطلقتم من جملة رتيبة وارخيتم العنان لفوضوية الطبيعة ، لهياج الذرات ، فان الرتابة ستزول .

وهنا يجب أن نتساءل : كيف امكن للرتابة أن تحدث في البدء ؟ لماذا كان ممكنا صنع ترتيب بدئي ؟ فالصعوبة تأتي من أننا نبدأ بشيء رتيب ولكن لا ننتهي الى شيء رتيب . انه أحد أحكام الطبيعة أن الاشياء تسير دوما من حالة رتيبة الى حالة فوضوية . وبهذه المناسبة لاحظوا أن كلمة رتابة ككلمة فوضى، هي مثال على تلك الكلمات التي تعني، عند الفيزيائي، شيئا يختلف عن المعنى الدارج . فالرتابة هنا لا شأن لها بما يمكن أن يشتهيه الكائن البشري ؛ بل وبكل بساطة ، اما أن يكون لدينا حد فاصل، بعض في جهة والباقي في الاخرى ، أو يكون لدينا اختلاط تام ـ تلك هما الرتابة والفوضى .

تعود المسألة اذن الى معرفة كيف أمكن للجملة أن تكون رتيبة في البدء ولماذا ، عندما نعتبر وضعا عاديا ليس فيه سوى رتابة جزئية ، يمكن أن نستنتج ان هذا الوضع آت على الارجح من وضع كان أكثر رتابة ؟ اذا

رأيت في وعاء ماء أزرق دامسا في جهة وماء صافيا في الجهة الاخرى وماء يميل للزرقة في الوسط وعلمت ان هذه الجملة متروكة وشأنها منذ عشرين أو ثلاثين دقيقة فسوف استنتج أن الانفصال كان ، قبل الآن ، أكثر كمالا . ولو انتظرت أكثر لأصبح المزج أكثر تداخلا . ولو علمت أن هذه الجملة لم تمس منذ وقت طويل لاستنتجت شيئا ما عن حالتها الماضية . ان التطور المنتظم للون في المنطقة الوسطى لا يمكن ان يأتي الا من انفصال أكثر حدة في الماضي ؛ وفي الحقيقة : لو لم يكن الانفصال أكثر حدة لكان للمزيج وقت كاف لكي يحدث بشكل أكثر كمالا . فمن الممكن اذن أن نستنتج من الحاضر شيئا مؤكدا عن الماضي .

وفي الواقع ليس هذا ، بصورة عامة ، ما يفعله الفيزيائيون . فهم أميل الى الاعتقاد بأن المسائل التي يجب حلها هي من النوع « تلك هي الظروف الحاضرة ، ماذا سيحدث الآن ؟ » لكن جميع علومنا الاخرى تعالج مسائل مختلفة تماما . اذ أن جميع مواضيع الدراسات الاخرى ــ التاريخ والجيولوجيا وتاريخ الفلك ... ــ تطرح قضايا من نوع آخر . فالتنبؤات التي تقوم بها هذه العلوم هي ، كما يبدو لي ، من نوع مختلف تماما عن قضايا الفيزيائيين . فالفيزيائي يقول : « في هـذه الظروف وتلك ، سأقول لكم ما سيحدث بعدها » ؛ لكن الجيولوجي يقول شيئا كالتالي : « لقد حفرت في الارض فوجدت عظاما معينة . وأتنبأ أنكم لو حفرتم بالقرب من هنا فستجدون عظاما مشابهة » . والمؤرخ ، رغم انه يهتم بالماضي ، يمكن أن يفعل ذلك عند الكلام عن المستقبل ؛ فعندما يقول ان الثورة الفرنسية قد حدثت عام ١٧٨٩ فانه يعني أنكم لو فتشتم في كتاب آخر يبحث في الثورة الفرنسية لوجدتم نفس التاريخ ؛ فيقوم ، بهذا التعبير ، بنوع من التنبؤ عن شيء لم يشاهده بعد ، عن وثائق ما تزال قيد الاستكشاف . ونتساءل كيف يمكن ذلك ؛ والجواب الوحيد هو أن نفترض أن العالم كان ، في الماضي وبهـذا المعنى ، أكثر رتابـة مما هو عليه اليوم .

لقد اقترح بعضهم أن العالم كان قد ترتب كما يلي : في البدء ، لم يكن العالم بأسره سوى حركات فوضوية كالماء الخليط . وقد رأينا أننا

لو انتظرنا الوقت الكافي ، ازاء عدد قليل من الذرات ، قد نشاهد انفصالا يحدث بالصدفة . فاقترح بعض الفيزيائيين (منذ قرن مضى) فكرة أن العالم ، خلال حياته ، لا يقوم الا بعمليات تفاوت . (وكلمة تفاوت تعني هنا انحرافا صغيرا للحالة الراهنة عن الحالة الطبيعية النسيقة فوضويا) وهذا التفاوت يتناقص الآن من تلقاء ذاته . لكنكم ستقولون : « لكن فكر في الزمن الذي يجب أن ننتظر كي يكون لنا حظ في رؤية تفاوت عظيم كهذا » . وانا أعلم ذلك حقا ؛ لكن ، لو لم يكن التفاوت على درجة من العظم تؤدي الى تطور يولد مخلوقات ذكية لما كان هنا انسان يهتم به ؛ اذ لا بد من انتظار وجودنا ، نحن ، كي نهتم به — ووجودنا يحتاج الى تفاوت هو ، على الاقل ، بنفس العظم[1] . لكنني أعتقد أن هذه النظرية ليست صحيحة . اعتقد انها نظرية حمقاء للسبب التالي : اذا كان العالم أكبر بكثير ، بذراته المتناثرة في كل مكان والمتخالطة منذ البدء ، ورصدنا الذرات في منطقة ما فوجدناها منفصلة عن بعضها فليس من سبب يجعلني استنتج أن الذرات منفصلة عن بعضها في غير هذه المنطقة ؛ بل على العكس : لو وجد التفاوت ولاحظت شيئا غريبا في منطقة ما فالاحتمال الاكبر هو عدم وجود شيء غريب في غير هذه المنطقة ، والا ، يجب أن تقف كثير من الصدف الى جانبي — أن أكون انسانا محظوظا جدا — كي تحدث كل هذه الشذوذات معا — لكن يجب أن لا نعتمد كثيرا على الحظ ! ففي تجربة الماء ، الازرق والصافي ، اذا حصل وانفصلت الذرات في منطقة صغيرة من المزيج ، فان الحالة الاكثر احتمالا لباقي الماء هي الاختلاط التام . وعلى هذا وبالرغم من أننا لدى رصد النجوم ، رصد العالم ، نرى كل شيء مرتبا جيدا ، فان التنبؤ يقضي بأننا عندما نفحص منطقة كانت مجهولة سنجد الفوضى والاختلاط . وبالنتيجة ، اذا كان انفصال المادة الى نجوم وفضاء — والنجوم ساخنة والفضاء بارد — ناجما عن التفاوت فيجب أن نتوقع عدم وجود نجوم منفصلة عن باقي الفضاء

---

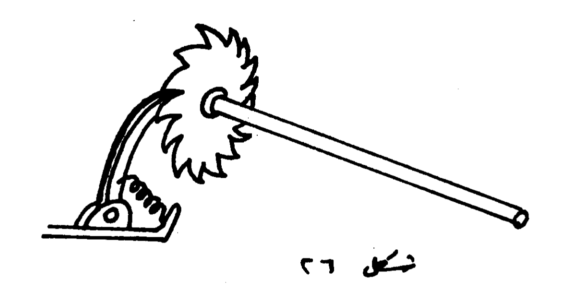
(1) لفهم هذه المحاكمة جيدا يجب أن لا يغرب عن بال القارىء أن الحالة الطبيعية هي الفوضى التامة ، والتفاوت هو انحراف نحو الرتابة وهو ، على هذا الاساس ، شذوذ عن الحالة الطبيعية . (المترجم)

في المناطق التي لم نرصدها بعد . لكن بما اننا نعتقد أننا ، في الاماكن التي لم نشاهدها بعد ، سنجد نجوما في حالة طبيعيــة ، أو سنقرأ تاريخ نابليون كما جرى ، او سنرى عظاما شبيهة بتلك التي رأيناها قبلئذ ، فان نجاح هذه العلوم يدل على أن العالم لا يأتي من تفاوت بل يأتي من حالة كان فيها منفصلا ، أكثر رتابة ، في الماضي منه في الحاضر . وهكذا اعتقد انه يجب أن نضيف الى قوانين الفيزياء فرضية أن العالم كان أكثر رتابة ، بالمعنى الفني المذكور آنفا ، منه اليوم — أظن أن هذه الفرضية لازمة لجعل مفهوم اللاعكوسية ذا معنى وقابلا للفهم .

ان نص هذه الفرضية نفسه مغلوط ، بدهيا ، في الزمان : انه يؤكد ، بشكل ما ، أن الماضي يختلف عن المستقبل لكن هذا يخرج عن نطاق ما نسميه عادة قوانين فيزيائية ، لاننا نميل اليوم الى التفريق بين القوانين الفيزيائية ، التي تقرر القواعد التي يسير بموجبها العالم ، عن القانون الذي يدل على حالة العالم في الماضي . لان هذا القانون الاخير يعد من مجال التاريخ الفلكي ؛ وربما ينضم هذا القانون في المستقبل الى نطاق الفيزياء .

هذا ويوجد بعض جوانب مهمة اخرى لموضوع اللاعكوسية ، وأريد ان أشرحها . فهناك جانب يستحق الدراسة خصوصا وهو : كيف تعمل حقا آلة لاعكوسة ؟

لننشىء جهازا نتأكد انه لا يمكن ان يعمل الا في اتجاه واحد . أختار دولابا مسننا في محيطه كالمنشار . وكل سن له انحدار شديد في احدى

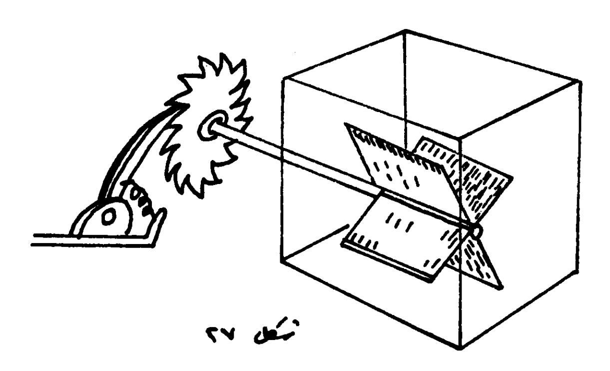


شكل ٢٦

جهتيه وانحدار خفيف في الجهة الاخرى . هـذا الدولاب يدور حول محوره ؛ ويوجد لسان يلعب دور سقاطة تدخل بين أسنان الدولاب من طرفها المدبب وطرفها الآخر مثبت مع امكانية دوران حول محور صغير كما في الشكل ٢٦ ، كما يوجد نابض صغير يعيد السقاطة دوما الى الفجوة بين سنين .

ان هذا الدولاب لا يمكن أن يدور الا في اتجاه واحد . واذا حاولتم تدويره في الاتجاه الآخر فان السقاطة الداخلة في الفجوة تمنعه من ذلك . اما في الاتجاه المسموح به فان راس السقاطة ينزلق بسهولة على الانحدار الخفيف للسن (أنتم تعرفون هذا التركيب ، فهو يستعمل في الميقاتيات وساعات اليد) . ان هذا التركيب لاعكوس تماما لان الدولاب لا يمكن أن يدور الا في اتجاه واحد .

والآن يمكن أن نتصور استعمال هذا التركيب ، هذا الدولاب الوحيد الاتجاه ، بشكل مفيد ومهم . فأنتم تعلمون أن الجزيئات لهـا حركـة فوضوية دائمة ، وعندما تصطدم جزيئات الهواء بصفيحة خفيفة فانها تسبب للصفيحة ارتجافا ضعيفا تحت وطأة هذه الصدمات . وعلى هذا الاساس لنركب ، على محور دولابنا السابق ، أربع صفيحات رقيقـة نضعها ضمن علبة من الزجاج مليئة بالهواء كما في الشكل ٢٧ .


شكل ٢٧

ان الصفيحات في العلبة تعاني على الدوام رجما فوضويا من قبل جزيئات الهواء في العلبة . بعض هذه الصدمات يدفع الصفيحة باتجاه وبعضها الآخر في الاتجاه الآخر . لكن السقاطة تمنع الدوران في أحـد الاتجاهين وتسمح له بالاتجاه الآخر ، مما يجعل الدولاب يدور على الدوام

في الاتجاه المسموح ونحصل على نوع من الحركة الدائمة . وما ذلك الا لان الدولاب المسنن لاعكوس .

ولكن لنفحص هذه العملية بامعان . عندما تشتغل الآلة فان الدولاب، عندما يدور في الاتجاه المسموح ، يرفع السقاطة حتى تهوي فجأة في الفجوة . ولكنها عندئذ تنزو . فاذا كانت المرونة كاملة فان السقاطة ستنزو وتنزو باستمرار . وأثناء نزوها نحو الاعلى يمكن للاسنان أن تمر من تحتها ، حتى في الاتجاه الممنوع . وعندها لا تشتغل الآلة كما نريد ، اللهم الا اذا تدبرنا الامر بحيث تبقى السقاطة في الفجوة أو لاتنزو أكثر من مرة أو مرتين ، ولكي لا تنزو يجب أن نقوم بعمليـة اخماد لنزوها . والاخماد يولد احتكاكا . فالسقوط وانزلاق السقاطة على سفح السن وارتطامها بقعر الفجوة والاخماد — ضرورية لكي تشتغل الآلة باتجاه واحد — كل ذلك يولد حرارة تؤدي الى تسخين الدولاب أكثر فأكثر . وعندما يسخن كثيرا يتدخل شيء جديد في الموضوع . وكالغاز الذي ذراته في حالة هياج حراري داخل العلبة حول الصفيحات ، فان الدولاب والسقاطة يبدآن ، تحت تأثير السخونة ، بالاضطراب أكثر فأكثر وبشكل فوضوي . وسيأتي وقت يصبح فيه الدولاب والسقاطة ساخنين لدرجة أن السقاطة تروح تقفز باستمرار وتنزو صعودا وهبوطا على الدولاب بسبب هياج ذراتها العنيف ، نفس الهياج الحراري الذي يتسبب في تدوير الصفيحات . وأثناء نزوات السقاطة يمكن لاسنان الدولاب أن تمر من تحتها في الاتجاهين . وهكذا لا يعود لدينا آلة في اتجاه واحد . فهي يمكنها أن تدور في الاتجاه المعاكس للاتجاه الذي نتوقع لان ، في كل مرة تنزل السقاطة ، سوف تنزل على السفح الضعيف الانحدار وتدفع الدولاب في الاتجاه المضاد ؛ ثم تنزو وتهوي من جديد على السفح الضعيف الانحدار التالي ؛ وهكذا عندما يصبح الدولاب أسخن من الصفيحات يدور الدولاب في الاتجاه السيء .

لكن أين تتدخل ، في هذا التركيب ، درجـة حرارة الغـاز حول الصفيحات ؟ لنفترض أننا حذفنا هذا الجزء من الجهاز . فالسقاطة ،

التي تهوي على السفح الضعيف الانحدار تدفع الدولاب ، عندئذ وفي كل مرة ، في الاتجاه المعاكس (بالمقلوب) ، وبعدها يأتي حالا السفح الشديد الانحدار ليرتطم بالسقاطة وينزو ، بالدولاب كله ، في الاتجاه الآخر (المسموح) ؛ ولمنع نزوات الدولاب نخمدها بواسطة صفيحات نثبتها على المحور وتتكفل مقاومة الهواء لحركة الصفيحات باحداث الاخماد المطلوب لنزوات الدولاب . وعندها لا يدور الدولاب الا في اتجاه واحد (بالمقلوب) . والنتيجة العامة لذلك كله هي : ان دولابا من هذا النوع ، في اي تركيب كان ، يدور في اتجاه معين اذا كان أحد الطرفين أسخن من الآخر ، اما اذا كان هذا الطرف أبرد فان الدولاب يدور في الاتجاه الآخر . ولكن بعد ما يحدث التبادل الحراري بين الطرفين ، الدولاب والصفيحات، ويصبحان في درجة حرارة واحدة فان الآلة تتوقف عن الدوران . تلك هي التفاصيل التكنيكية لاسباب تطور الحوادث الطبيعية في اتجاه معين عندما لا يوجد توازن ، اي ما دام أحد الطرفين اكثر هياجا من الآخر ، او أكثر زرقة .

ان انحفاظ الطاقة قد يوحي لنا بامكانية الحصول على طاقة قدر ما نريد . ان الطاقة في الطبيعة لا تزيد ولا تنقص . وان طاقة البحر ، طاقة الهياج الحراري لذراته ، لا يمكن عمليا الاستفادة منها . ولكي نستطيع ذلك ، لكي نستطيع ترويضها وجعلها مفيدة ، لا بد من استخدام فرق حراري لا يمكن بدونه ان نستغل هذه الطاقة بالرغم من وجودها . فهناك فرق كبير بين كمية الطاقة وجاهزيتها للاستخدام . ان طاقة البحر هائلة لكنها ليست جاهزة ، كما هي ، للاستخدام .

وانحفاظ الطاقة يعني ان الطاقة الكلية في العالم تبقى ثابتة على قيمتها . لكن كل هذا الهياج الفوضوي يمكن ان يوزع هذه الطاقة في الفضاء بشكل متساو نسيق لدرجة انها ، في بعض الظروف ، لا يمكنها ان تدفع الاشياء لتسير في اتجاه معين لا في الاتجاه الآخر ؛ ولا قدرة لنا ، والحالة هذه ، على استغلالها .

وسأحاول استخدام تشبيه يسمح لكم بتقدير هذه الصعوبة . لا

ادري اذا كان قد حدث لكم ـ لا شك نعم ـ أن كنتم جالسين على شاطىء البحر (البلاج) وحولكم عدة مناشف وانهمر عليكم فجأة مطر غزير ؛ فجمعتم مناشفكم على عجل وهرعتم راكضين نحو حجيراتكم الشاطئية ؛ وهنا تبداون بتنشيف انفسكم فتجدون المنشفة الاولى رطبة قليلا ولكن انشف منكم ؛ فتستمرون في التنشيف بها الى أن تشعروا انها صارت مبلولة أكثر من اللازم فأصبحت تبلكم بقدر ما تنشفكم ؛ فتأخذون غيرها. وهكذا تكتشفون في النهايــة ، بكل أسف ، أن جميع المناشف مبلولة وانتم ما تزالون مبلولين . فبالرغم مــن كل مناشفكم لن تتوصلوا الى تنشيف جلودكم تماما لانه لم يعد يوجد فرق بــين بلل جلودكم وبلل المناشف . وهنا يمكن أن أخترع كمية أسميها « قابلية امتصاص الماء ». فالمنشفة لها ، في النهاية ، نفس قابلية امتصاص الماء التي لكم مما يجعلها تمتص منكم ، أثناء عملية التنشيف ، ماء بقدر ما يأخذ جلدكم منها . لكن هذا لا يعني ان المنشفة فيها من الماء قدر ما على جلدكم ـ المنشفة الكبيرة تحوي ماء أكثر من المنشفة الصغيرة ، ولكن لها نفس الرطوبة (البلل) . فعندما تصل الاشياء كلها الى رطوبة واحدة لا يمكن عمل شيء.

والماء هنا كالطاقة هناك . كمية الماء الكلية لا تتغير . (اذا كان باب الحجيرة مفتوحا وركضتم في الشمس كي تنشف جلودكم ، أو وجدتم منشفة اخرى اكثر جفافا فقــد انقذتم انفسكم . ولكن افترضوا أن الحجيرة مغلقة ولا شيء عندكم غير هذه المناشف ، فلا تجدون سواها) . وبمحاكمة مماثلة ، اذا تصورتم منطقة معزولة من العالم ـ انعزلت بفعل احدى صدف الطبيعة ـ فان الطاقة ، كالماء في مثالنا ، تتوزع بالتساوي حتى لا يعود اي شيء توجيهي ذي اتجاه واحد وعندها لا يمكن ان نجني اية فائدة من هذا العالم .

وهكذا في تركيبنا ذي الدولاب المسنن والسقاطة ، وهو جملة معزولة لا يتدخل فيها شيء ، تتساوى درجتا الحرارة في الطرفــين ولا يعود الدولاب يدور في أي من الاتجاهين ، وبالصورة نفسها ، في كل جملة معزولة لشأنها تسعى الطاقة لتتوزع عليها بتساو أحسن حتى أننا لن نستطيع في النهاية أن نجني منها أية ثمرة .

وبهذه المناسبة فان الشيء الذي يقابل الرطوبة أو « قابلية امتصاص الماء » يسمى درجة الحرارة . وبالرغم من اننا نقول عن شيئين بدرجة حرارة واحدة انهما في حالة توازن حراري فان هذا لا يعني أنهما يحتويان على طاقتين متساويتين بل يعني انهما متساويان في سهولة (أو صعوبة) استخراج الطاقة منهما . فدرجة الحرارة هي « قابلية امتصاص الطاقة» ولهذا السبب فانهما ، عندما يوضعان جنبا الى جنب لا يحدث ظاهريا اي شيء ؛ فهما يتبادلان طاقتين متساويتين ونتيجة التبادل معدومة . وهكذا عندما تتساوى درجات الحرارة كلها لا توجد طاقة جاهزة . ومبدأ اللاعكوسية هو : اذا عزلنا اشياء معا وكانت في درجات حرارة مختلفة فيما بينها فان درجات الحرارة هذه لا تلبث أن تتقارب فيما بينها شيئا فشيئا بمرور الزمن ، وأثناء ذلك تتناقص باستمرار جاهزية الطاقة للاستخدام .

ولهـذه النتيجـة اسم آخر هو قانون الانتروبية وينص على أن الانتروبية تزداد دوما . ولكن لنترك هذه الكلمات ولنقل بالاحرى ان جاهزية الطاقة تتناقص دوما . وهذه احدى خاصيات العالم وسببها فوضى الحركات الذريـة . اذا عزلنا جسمين لوحدهما فان درجتي حرارتهما ستتساويان . ولو وضعتم معا جسمين لهما درجة حرارة واحدة ، ماء على موقد منطفىء فلن نرى الماء يتجمد والموقد يسخن . لكنكم اذا وضعتم جليدا على موقد مشتعل فان الحرارة ستمر في اتجاه واحد . فالاتجاه الواحد يؤدي دوما الى خسارة في جاهزية الطاقة .

هذا كل ما اردت قوله حول هذا الموضوع ، لكنني سأضيف بعض الملاحظات على بعض الجوانب . فنحن لدينا هنا مثال على مفعول بدهي ، هو أن اللاعكوسية ليست نتيجة مباشرة للقوانين بل هي ، على العكس ، نتيجة بعيدة للقوانين الاساسية . ولا بد من تحليل طويل كي نفهم تفسير هذا المفعول . ولكنه ، مع ذلك له الاهمية الاولى في تدبير شئون العالم ، في تطور العالم الفعلي لدى جميع الحوادث الواضحة . فالذاكرة والسلوك الشخصي والتمييز بين الماضي والمستقبل تتعلق به كليا ؛ ومع ذلك فان تفسيره لا ينتج بدهيا من معرفة القوانين ، بل يتطلب تحليلا طويلا .

هـذا ويوجد غالبا بون شاسع بـين القوانين التفصيلية والمظاهر الاساسية لظاهرة واقعية . فعندما تشاهدون ، مثلا ، جمودية من بعيد أو تراقبون قطعا ضخمة من الجليد تسقط في البحر وترون كيف يتحرك الجليد ... الخ ، ليس من المهم والأساسي أن تتذكروا أن الجمودية مصنوعة من بلورات صغيرة سداسية . ومع ذلك لو حللنا ذلك بشكل جيد ، فان حركة الجمودية هي في الواقع نتيجة لخواص هذه البلورات السداسية . ولكن لا بد من زمن طويل لفهم سلوك الجمودية (الحقيقة ان احدا لا يعرف الجليد بشكل جيد ، بالرغم من جميع الدراسات التي اجريت على بلوراته) غير أننا نأمل ، في النهاية ، أن نفهم الجمودية بعد أن نفهم بلورة الجليد .

وبعد كل شيء ، وبالرغم من أن موضوع هذه المحاضرات هو أسس قوانين الفيزياء ، يجب علي أن أقول لكم أن معرفة قوانين الفيزياء كما نعرفها اليوم لا تؤدي الى أن نفهم الامور مباشرة ودون عناء . بل ان هذا يستغرق وقتا ؛ ومع ذلك يبقى هذا الفهم جزئيا ، حتى ليبدو أن الطبيعة مكونة بشكل يجعل أهم الاشياء في عالم الحقيقة تبدو نتائج معقدة وعرضية لعدد كبير من القوانين .

وكمثال آخر أسوق نوى الذرات ؛ وهي كائنات معقدة جدا تحتوي على عدة جسيمات نووية : البروتونات والنترونات ؛ وفيها ما نسميه مستويات طاقة . أي أن النواة يمكن أن توجد في عدة حالات تتصف كل منها بمستوى طاقة . ولكل نواة مجموعة مستويات خاصة بها تميزها عن سواها . وحساب أوضاع مستويات الطاقة هذه هو مسألة عويصة لا نعرف حلها الا بشكل جزئي ؛ لان هذه الاوضاع تتعين بأفعال متبادلة على درجة كبيرة من التعقيد . فلا يوجد اذن سر خفي في أن الآزوت ، بجسيماته الخمس عشرة ، له مستوى على ٢ر٤ مليون فولت ومستوى آخر على ١ر٧ مليون فولت ... الخ . لكن الشيء العجيب في الطبيعة هو أن خاصية العالم كله تتوقف على موضع مستوى خاص بالذات في نواة معينة . ففي نواة الفحم ١٢ يوجد ، هكذا ، مستوى على ٨٢ر٧ مليون فولت . وهذا يؤثر في كل شيء .

واليكم شرح ذلك . لنبدأ بالهدروجين ، اذ يبدو أن العالم كان في البدء لا يحوي عمليا سوى الهدروجين . وكلما تكاثف هذا الهدروجين ، بفعل التجاذب التثاقلي ، يسخن وتحدث تفاعلات نووية يمكن ان تشكل الهليوم ، وهو بدوره يلتحم جزئيا بالهدروجين ليشكل بعض عناصر أثقل قليلا . لكن هذه العناصر الاثقل تتفكك مباشرة ومن جديد الى هليوم . وخلال زمن ما يبقى ، اذن ، أصل جميع العناصر الاخرى في العالم سرا كبيرا لان هذا الطبيخ المنطلق من الهدروجين والذي ينضج في النجوم لا يمكن ان يعطي ، على ما يبدو ، شيئا غير الهليوم وبضعة عناصر أخرى. وازاء هذه المعضلة اقترح هويل وسالبيتر(١) حلا ممكنا : بما أن ثلاث نوى هليوم يمكن أن تشكل بلقائها نواة فحم يمكننا ان نحسب بأي تواتر يحدث ذلك في النجوم . وتبين بنتيجة الحساب أن هذا لا يحدث أبدا الا اذا صدف ان الفحم يتشكل في المستوى الطاقي ٧٫٨٢ مليون فولت . وفي هذه الشروط ، عندما يلتقي ثلاث نوى هليوم فانها ستبقى ملتحمة معا زمنا أطول قليلا ، وسطيا ، مما لو كان هذا المستوى غير موجود . واذا حدث فان الزمن هذا يكون كافيا لحدوث أشياء أخرى ، لصنع عناصر اخرى . فالفحم ، اذا تشكل في المستوى ٧٫٨٢ مليون فولت ، يفسر كيف تتشكل العناصر الاخرى الواردة في الجدول الدوري للعناصر. وبهذه المحاكمة ، التي اقترحت قبل أن يكتشف المستوى ٧٫٨٢ مليون فولت ، أمكن التنبؤ عن هذا المستوى ثم أيدت التجارب وجوده . ونتيجة ذلك أن وجود كل هذه العناصر في الطبيعة يتوقف كثيرا على وجود هذا المستوى الخاص في الفحم . لكن قيمة هذا المستوى تبدو لنا ، نحن العالمين بقوانين الفيزياء ، مجرد صدفة عويصة للتفاعلات المعقدة بين ١٢ جسيما . ومغزى هذه الحكاية كلها انها توضح بجلاء أن معرفة قوانين الفيزياء لا تعين ، آليا ومباشرة ، في فهم الحوادث الكبرى في هذا العالم؛ فتفاصيل التجربة الواقعية هي غالبا بعيدة جدا عن القوانين الاساسية الكبرى .

---

(١) فريد هويل ، فلكي – فيزيائي بريطاني من كمبردج . ادوين سالبيتر ، فيزيائي أمريكي من جامعة كورنيل .

هذا ويمكن أن ندرس ونناقش هذا العالم على درجات وفق تسلسل معين . وانا لا أقصد أن أكون دقيقا فأقسم العالم الى درجات معينة ، لكني سأشرح لكم ما أعنيه من خلال بعض الامثلة .

فنحن عندنا ، في طرف ، القوانين الاساسية للفيزياء . ثم نخترع مفاهيم تقريبية تتفسر في النهاية ، أو هكذا نتوقع ، بتداخل القوانين الاساسية . كمفهوم « الحرارة » مثلا . ان الحرارة ليست سوى هياج، وقولنا ان جسما « حار » يعني بكل بساطة أن كوما من الذرات في حالة هياج لكن عندما نتكلم عن الحرارة يمكن أن ننسى ، لفترة ، هياج الذرات – كما أننا ، عندما نتكلم عن الجمودية ، لا نفكر باستمرار بهطول الثلج ولا ببلورات الجليد السداسية . وكمثال آخر هناك بلورة الملح . انها ليست سوى بروتونات ونترونات والكترونات ؛ لكن مفهوم « بلورة الملح » يحوي ضمنا وفي الاصل بنية من الافعال المتبادلة . وكذلك أيضا مفهوم الضغط .

وفي درجة أعلى نجد بعض خواص المادة – كقرينة الانكسار التي تصف سلوك الضوء عندما ينفذ في المادة ؛ أو « التوتر السطحي » الذي يعبر عن أن المادة تتجمع على نفسها ، مفهومان يعبر عنهما باعداد . وهنا اذكركم أنه يلزمنا المرور بعدة قوانين قبل أن ندرك أننا ازاء تجاذب الذرات . لكننا نستمر في الكلام عن « التوتر السطحي » ولا نهتم بالميكانيكية الداخلية لهذا المفهوم عندما نستخدمه .

لنصعد أيضا درجة اخرى فنجد أمواج البحر و « العاصفة » ، وهذه كلمة تمثل كمية كبيرة من الظواهر ؛ وكذلك « بقعة شمسية » و « نجم » اللتان تجمعان أشياء كثيرة . وفي هذه الدرجة لا يوجد غالبا ما يستحق الدخول في التفاصيل ؛ ونحن لو اردنا ذلك لن نستطيعه ، لاننا كلما صعدنا في هذا الدرج تراكمت الصعوبات وتناقصت قدرتنا على اجتيازها .

واذا استمررنا في الصعود سنصل الى مفاهيم مثل تقلص العضلات.

أو الدفعة العصبية التي هي ذات تعقيدات جمة لدى الفيزيائي وتنم عن عملية تنظيم مدهش للمادة . وبعدها نصل الى اشياء مثل « ضفادع » .

ونصعد فنجد كلمات ومفاهيم مثل « انسان » و « تاريخ »و«سياسة» وهكذا ، سلسلة طويلة من الكلمات التي نستعملها لفهم العالم في درجة أعلى . وفي اعلى من ذلك نجد : الشر والجمال والامل ...

والآن ، اذا سمحتم لي بالاستعارة المجازية ، اي الطرفين اقرب الى الله ؟ الجمال والامل أم القوانين الاساسية ؟ ان مايجب أن نقوله ، على ما ارى ، هو طبعا انه يجب أن نعتبر مجموعة الصلات المتبادلة البنيوية، وأن كل العلوم ، ليس فقط العلوم بل كل المجهودات الفكرية ، تسعى الى اظهار الصلات في التسلسل والى ربط الجمال بالتاريخ والتاريخ بفيزيولوجيا الانسان ، والفيزيولوجيا بعمل الدماغ والدماغ بالدفعات العصبية والدفعات العصبية بالكيمياء ، وهكذا نحو الاعلى أو نحوالاخفض في الاتجاهين . واليوم ، لافائدة من ادعاء العكس ؛ فنحن لانستطيع بعد أن نضطلع تماما بايجاد الصلات كلها من احد الطرفين الى الاخر لاننا ما نزال في بدء الطريق لادراك هذا التسلسل النسبي .

واعتقد أن أيا من الطرفين ليس قريبا من الله . فالتمسك بأحد الطرفين والاصرار على السير في اتجاه الطرف الاخر ، بأمل التوصل الى فهم كامل ، موقف خطأ . فالانحياز الى طرف الشر والجمال والامل خطأ كالانحياز الى طرف القوانين الاساسية ، ظنا بامكانية الوصول الى فهم العالم بشكل عميق عن طريق احد الاتجاهين . وليس من حق انصار كل طرف أن يستخفوا بآراء الطرف الآخر (الواقع أن هذا الاستخفاف غير موجود ، مهما ادعى الاخرون) . واكثر العاملين في هذا الحقل يقفون بين الطرفين . يصلون حلقة بأخرى ويحسّنون باستمرار فهمهم للعالم ويشتغلون في الطرفين وفي الوسط بحيث نتمكن شيئا فشيئا من فهم تسلسل الصلات في هذا العالم .

٦

الاحتمال والارتياب

الصفات الكمومية للطبيعة

ان الحدس ، المستند الى الخبرة العادية في الامور اليومية ، هو الذي كان يوحي بالتفاسير المعقولة للوقائع وذلك في أول عهد الانسان بالملاحظات التجريبية أو بأية ملاحظات علمية أخرى . لكننا كلما امعنا في محاولاتنا لتوسيع دائرة ملاحظاتنا وربط أجزائها بعضا ببعض ، اي كلما ازداد عدد الظواهر التي نوليها اهتمامنا، فان هذه التفاسير لا تبقى مجرد تفاسير بل تصبح مانسميه قوانين ولهذه القوانين خاصية غريبة : غالبا ماتبدو اقل فأقل معقولية ، أكثر فأكثر ابتعادا عن الحدس الواضح . خذوا مثلا ، في نظرية النسبية ، هذه الفكرة : اذا رصدتم حادثين متزامنين (يحدثان في لحظة واحدة) ، فان هذا التزامن خاص بكم ، ويمكن لراصد آخر ان يكون قد رأى أحد الحادثين قبل الاخر ؛ فالتزامن ليس اذن سوى انطباع ذاتي .

ولايوجد أي سبب لكي لايكون كذلك : فنحن في الواقع نتناول في تجاربنا الدارجة عددا كبيرا من الجسيمات وحركات بطيئة جدا او ظروفا اخرى خاصة جدا تجعل خبرتنا عن الطبيعة محدودة ولاتتعدى جزءا صغيرا من الظواهر الطبيعية التي تقع تحت تجاربنا المباشرة . لكن القياسات والتجارب الدقيقة هي الكفيلة وحدها باعطائنا صورة شاملة ؛ وهنا تحصل المفاجآت : فنجد أشياء تختلف عما كنا نتوقع أو نتصور، ونضطر الى القيام بمجهود كبير كي نحصل على تصور وفهم واقعيين لما حدث فعلا وغير مبنيين على أوهام زائفة . والذي أناقشه في هذه المحاضرة

هو موضوع من هذا القبيل . ولنبدأ بقصة النور . ففي القديم كان يظن أن النور يتصرف أساسيا مثل سيل من الجسيمات : كالمطر أو كطلقات البندقية . وبعد بحوث عميقة تبين ان ذلك خطأ وان النور يتألف من امواج كالامواج على سطح الماء مثلا . ثم ، في القرن العشرين ، أثبتت بحوث جديدة أن النور يتصرف ، في الواقع ورغم كل شيء ، كجسيمات في ظروف عديدة . وهذه الجسيمات يمكن عدها في المفعول الفوتوكهربائي ــ وتسمى اليوم فوتونات . اما الالكترونات فكانت تتصرف ، عنداكتشافها وبصورة طبيعية ، كالجسيمات تماما أو كرصاصات البندقية . ولكن تبين فيما بعد ، في تجارب الانعراج مثلا ، أنها تتصرف أيضا كالامواج . وبمرور الزمن كانت تزداد الحيرة والتساؤل حول السلوك الحقيقي لهذه الاشياء . هل هي أمواج أم جسيمات ؟ كل شيء أصبح يبدو ذا مظهرين معا .

لكن هذه الحيرة زالت ، حوالي عامي ١٩٢٥ و ١٩٢٦ ، باكتشاف المعادلات الصحيحة في ميكانيك الكم . ونحن نعرف اليوم كيف يتصرف الضوء والالكترونات . ولكن كيف نسمي هذا التصرف ؟ فاذا قلت انها تتصرف كالجسيمات فان هذا خطأ كالقول بأنها تتصرف كالامواج . ان لها سلوكها الخاص بها ولايوجد مايشبهه والذي يجب أن نسميه «تكنيكيا» كموميا ؛ وهو يختلف عن كل ما الفتموه . والخبرة التي حصلتم عليها من تجاربكم العامة كلها غير كافية . فسلوك المادة في عالم الصغائر هو ، بكل بساطة ، سلوك مختلف . ان الذرة لا تتصرف مثل ثقل ينوس في طرف نابض كما انها لاتتصرف كنموذج مصغر لجملة شمسية ذات كواكب صغيرة تدور في مسارات صغيرة . وليس لها مظهر غيمة أو ضباب يحيط بالنواة . انها لاتشبه أي شيء آخر رأيتموه .

ومع ذلك يوجد شيء من البساطة . ان الالكترونات ، من وجهة النظر هذه ، تتصرف كالفوتونات تماما ؛ وهي جميعا مجنونة ولكن بالاسلوب نفسه تماما .

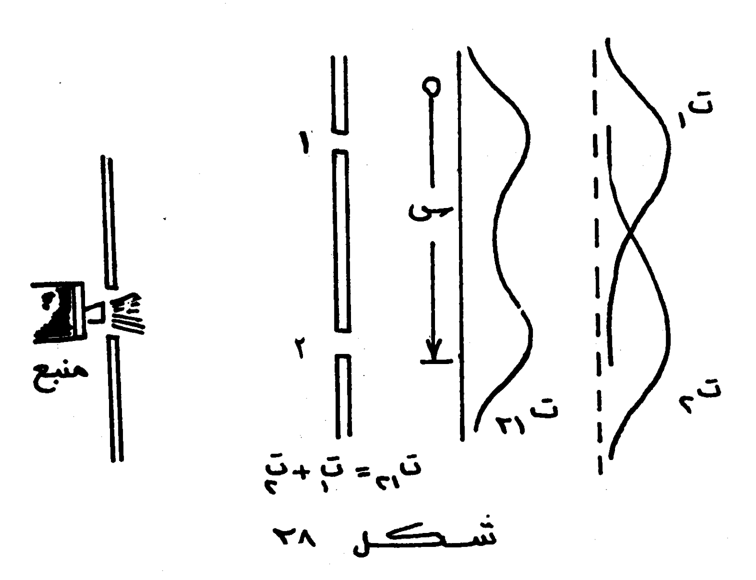
لابد اذن من قدر كبير من الخيال لتصور هذا السلوك لاننا سوف نشرح شيئا يختلف عن كل ماتعرفون . وربما كانت هذه المحاضرة ، من

وجهة النظر هذه على الاقل ، أصعب محاضرات هذه السلسلة . وليس الذنب ذنبي . فلو القيت سلسلة محاضرات عن الفيزياء وقوانينها ولم أتعرض لوصف السلوك الحقيقي للمادة في سلم الصغائر أكون بالتأكيد قد اخللت بواجبي . وهذا السلوك صفة تشترك فيها جميع الجسيمات في الطبيعية ؛ انها صفة شاملة ، واذا أردتم أن اتكلم لكم عن طبيعة قوانين الفيزياء فمن الاساسي أن اناقش هذا الجانب الخاص .

سيكون ذلك صعبا . لكن الصعوبة هي في الواقع نفسانية وتكمن في هذا العذاب الذي سوف تسببه لكم خواطر مثل « ولكن كيف يمكن أن يكون الامر هكذا » خواطر تعكس رغبة جامحة في العودة الى صورة مألوفة لكنها رغبة لاتجدي . ولن ألجأ الى وصف تشبيهي بظروف مألوفة بل الى وصف فحسب . لقد ذكرت الصحف يوما ما أنه لايوجد سوى اثني عشر رجلا يفهمون نظرية النسبية . لا اعتقد أن ذلك كان صحيحا ؛ بل ربما كان هناك رجل واحد فقط فهمها ؛ لانه قبل أن يكتب مقالته كان الوحيد الذي استوعبها . لكن كثيرا من الناس قد فهموها بشكل أو بآخر قبل قراءة المقالة وكانوا حتما أكثر من اثني عشر . لكنني بالمقابل أعتقد أن باستطاعتي القول انه لم يفهم أحد ميكانيك الكم . لكن لاتبالغوا في اعتبار هذه المحاضرة مأساة بل حاولوا بأي ثمن أن تفهموا ، بأي شكل كان ، ما سأصف لكم . فاهدأوا واعتبروا ذلك تسلية لكم . سأروي لكم كيف تتصرف الطبيعة . واذا رغبتم في أن تقبلوا ، بكل بساطة ، أنها تتصرف كما سأقول فسوف تجدونها جذابة وساحرة . واذا استطعتم أن تسكتوا عن أسئلة مثل « كيف يمكن أن يحدث هذا ؟ » فافعلوا ، والا فستغوصون وتغرقون في لجة عميقة لم يخرج منها انسان قط . فلا احد يدري كيف يمكن أن يحدث هذا .

سأفصل لكم اذن سلوك الالكترونات والفوتونات في أسلوبها الكمومي النموذجي . وساستخدم مزيجا من التشبيهات والخلافات . ولواستخدمت تشبيهات فقط لن أتوصل الى مبتغاي ؛ فلابد ، اذن وأيضا ، من استخدام الخلافات بينها وبين ظواهر اخرى مألوفة لديكم . وسأدقق في هذه

التشبيهات وهذه الخلافات فيما يخص سلوك الجسيمات أولا وتشبيهها بطلقات البندقية مثلا ، وفيما يخص سلوك الامواج ثانيا وتشبيهها بالامواج على سطح الماء مثلا آخر . وسأخترع تجربة معينة واروي لكم ماسيحدث لو أجريتها أولا على جسيمات ثم على أمواج ، واخيرا باستعمال الكترونات حقيقية أو فوتونات . ولن أهتم بغير هذه التجربة التي رتبت بحيث تحتوي على سر ميكانيك الكم كله وذلك كي أضعكم في مواجهة غرائب الطبيعة واسرارها وخصائصها مائة في المائة . وواقع الامر انه يمكن دوما شرح اي ظرف في ميكانيك الكم بالقول : « تذكروا حالة تجربة الثقبين . انها مثل هذه الحالة » . والان أروي لكم قصة الثقبين . ان فيها كل السر . لن اتجنب اي شيء سأكشف عن الطبيعة غطاءها واعريها في أكثر مظاهرها اناقة وصعوبة .



شكل ٢٨

لنبدأ برصاصات (شكل ٢٨) . افترضوا ان لديكم منبع رصاصات، رشاشا يقع وراء لوح من الصفيح فيه ثقب تمر منه الرصاصات . وعلى بعد كبير وراءه يوجد صفيح آخر فيه ثقبان ــ هما الثقبان الشهيران . وبما أنني سأتكلم عنهما كثيرا فسوف اسميهما ثقب رقم ١ وثقب رقم ٢ .

يجب أن تتصوروا ثقبين مدورين في ثلاثة ابعاد ، ويمثل الشكل مقطعالهما. ووراء هذا الصفيح الثاني وعلى مسافة كافية نضع لوحة ، حاجزاً يوقف الرصاصات ، ونوزع عليها ، في كل مكان ، عددا كبيرا من الاجهزة التي تشعر بوصول الرصاصات (ونسميها مشعرات) ؛ ففي حالة الرصاصات يمكن ان يكون المشعر علبة مليئة بالرمل توقف الرصاصات بحيث يمكن عدها . وتعود تجاربي الى احصاء الرصاصات التي تدخل في المشعر ، في علبة الرمل ، بحسب مكانها . ولتعيين المكان اقيس المسافة بين العلبة ونقطة ثابتة ، واسمي هذه المسافة س ، وساصف لكم مايحدث عندما اغير س ، اي عندما انقل المشعر من الاعلى نحو الاسفل مرحلة فمرحلة. واريد ، قبل كل شيء ، ان اجعل التجربة مثالية بفضل ثلاثة تحويرات طفيفة . افترض اولا ان الرشاش يضطرب في مكانه باستمرار وفي جميع الاتجاهات بحيث تخرج منه الرصاصات في جميع الاتجاهات وليس فقط نحو الامام . فيمكن لبعضها اذن ان ترتطم بالصفيح المحيط بالثقوب وترتد عنه . ثانيا ، نقبل ان للرصاصات كلها سرعة واحدة ، بالرغم من ان هذه الفرضية ليست هامة جدا . والتحوير الثالث هو الذي يجعل التجربة المثالية ذات اختلاف كبير عن الحالة الواقعية للطلقات ، وهو يتطلب أن تكون الرصاصات غير قابلة للفناء ، بحيث أنني ساجد في العلبة رصاصات كاملات وليس قطعا متكسرة ؛ وهذا يتحقق اذا كانت الرصاصات قاسية جدا والواح الصفيح مرنة .

وبموجب هذا التشبيه نلاحظ أن الرصاصات تنطلق واحدة بعد واحدة . وعندما تصل الطاقة الى العلبة تصل مع الرصاصة دفعة واحدة وعندما تعدون الرصاصات تحصونها : واحدة ، اثنتان ، ثلاث ، اربع رصاصات : اي انها تصل على شكل وحدات . وفي هذه الحالة نفترض ان لها جميعا حجما واحدا ؛ فكل رصاصة تصل الى العلبة كاملة او لاتصل بالمرة . واضيف انني لو وضعت علبتي رمل فلن احصل في لحظة واحدة على رصاصتين ، كل واحدة في علبة . وسأفترض ان الرشاش لايطلق بتواتر عال جدا بل يعطيني بين كل طلقتين الوقت الكافي كي افحص ماحدث فعندما يطلق الرشاش بتواتر ضعيف نفحص سريعا مايحدث : لن نرى

ابدا ، في وقت واحد ، رصاصة في كل علبة ، لان كل رصاصة تؤلف وحدة قائمة بذاتها .

والآن احصي العدد الوسطي للرصاصات التي تصل الى العلبة خلال فترة معينة من الزمن . لنقل أننا ننتظر ساعة ثم نعد الرصاصات في العلبة، وهكذا ساعة بعد ساعة ثم نحسب وسطي عدد الرصاصات . لنهتم بهذا الوسطي . يمكن أن نسميه احتمال الوصول لانه يعبر عن حظ كل رصاصة في اجتياز الثقوب والوصول الى العلبة في مكانها المعين بالمسافة س . لاشك أن عدد الرصاصات التي تصل الى العلبة يتغير عندما أغير س . وقد كتبت على الشكل ٢٨ افقيا عدد الرصاصات التي أعثر عليها في العلبة عندما أبقيها مدة ساعة في كل نقطة من الحاجز الثالث . وأحصل على منحن يشبه تقريبا المنحني $ت_{٢١}$ ، لأن العلبة ، عندما توجد وراء أحـد الثقبين مباشرة ، تستقبل عددا كبيرا من الرصاصات ؛ وهذا العـدد يتناقص كلما انحرفت العلبة جانبيا مبتعدة عن الثقب ، لأن الرصاصات التي ستصل اليها في هذه المواضع لابد لها ان تكون قد اصطدمت بحواف الثقب وانحرف مسارها نحو العلبة . وعندما تصبح العلبة بعيدة عن كل من الثقبين ، في منتصف المسافة بينهما ، يكون عدد الرصاصات التي تصل اليها أصغر مما يمكن . وهكذا نحصل على المنحني $ت_{٢١}$ الـذي يمثل عدد الرصاصات التي تمر من الثقب $_{١}$ ومن الثقب ٢ .

ولابد من لفت نظركم الى ان الكمية المحمولة على المنحني في الشكل لا تتجلى بشكل وحدات بل يمكن ان يكون لها أية قيمة . فقد نحصل على وسطي يساوي رصاصتين ونصف في الساعة رغم ان الرصاصات تصل واحدة فواحدة . وهـذا يعني عندئذ أن خمسا وعشرين رصاصة قـد وصلت خـلال عشر ساعات . وانتم تعرفون بالتأكيد المزاح القائل بأن السوري الوسطي عنده ثلاثة أولاد ونصف . ان هذا لا يعني أن كل عائلة عندها ثلاثة أولاد ونصف ــ فالاولاد يعدون بالوحدات . ومع ذلك فعدد الاولاد الوسطي يمكن ان يأخذ أية قيمة . وكذلك $ت_{٢١}$ عدد الرصاصات التي تصل الى العلبة خلال ساعة واحدة ليس بالضرورة ، وسطيا ، عددا

صحيحا . ونقيس احتمال الوصول ، وهذا تعبير تكنيكي عن العــدد الوسطي الذي يصل خلال زمن معين .

واخيرا يمكن بكل بساطة تحليل المنحني $ت_{21}$ كمجموع منحنيين : **احدهما يمثل ما أسميه $ت_1$ عدد الرصاصات التي تصل الى العلبة عندما أغلق الثقب ٢ بقرص من الصفيح ، والثاني $ت_2$ يمثل عدد الرصاصات التي تمر من الثقب ٢ عندما أغلق الثقب ١ . وبذلك نكتشف قانونا مهما جدا يقول بأن العدد الذي يصل لدى انفتاح الثقبين يساوي مجموع العدد الذي يمر من الثقب ١ مع العدد الذي يمر من الثقب ٢ . وهذه الفكرة ، أي الاكتفاء بجمع العددين ، أسميها « لا تداخل » .**

$$ت_{21} = ت_1 + ت_2 \quad \text{(لا تداخل)}$$

المنبع

$ف_1 + ف_2 = ف_{21}$

$ش_1 + ش_2 \neq ش_{21}$

$ش_{21} = (ه_{21})^2$

شكل ٢٩

ذلك هو شأن الرصاصات . وبعد الانتهاء منها نبدأ ، **هذه المرة ،** مع الامواج على سطح الماء (شكل ٢٩) .

المنبع الآن كتلة كبيرة نخفق بها الماء ، صعودا وهبوطا ، عنــد سطحه . وفي مكان لوح الصفيح الاول نضع سدا يوجد في منتصفه فرجة

تنفذ منها الامواج . وربما كان من الافضل اجراء التجربة على تجعدات صغيرة بدلا من الامواج العالية على سطح البحر ، وهذا يبدو اكثر حكمة : استعمل عندئذ أصبعي في خفق الماء صعودا وهبوطا لتوليد الويجات واستخدم لوحا شاقوليا من الخشب مغروزا في الماء وفيه ثقب على مستوى سطح الماء يسمح للمويجات بالمرور عبره . واضع وراءه لوحا آخر فيه ثقبان واخيرا ، بعيدا عن هذا اللوح ، اضع المشعر . وماذا استخدم كمشبعر ؟ ان المشعر يجب ان يقيس شدة خفقان الماء . يمكن مثلا ان أضع قطعة صغيرة من الفلين واقيس طاقة حركتها ، وهذه الطاقة متناسبة تماما مع الطاقة التي تنقلها المويجات . وملاحظة اخرى : اخفق الماء باصبعي بتواتر منتظم تماما لكي أحصل دوما على المسافة نفسها بين مويجتين . وميزة هامة أخرى للامواج على الماء هي أن القياس يمكن أي يعطي أية قيمة . ونقيس شدة التموج ، أو طاقة الفلينة . فاذا كانت الامواج ضعيفة ، أي اذا حركت اصبعي ببطء ، فان الفلينة لا تتحرك بعنف . ومهما كانت حركتها فانها تكون دوما متناسبة مع سعة الموجة . وهذه السعة يمكن ان تأخذ اية قيمة ، فلا تتجلى بشكل وحدات ولا تطيع القاعدة : كل شيء أو لا شيء .

والواقع اننا نقيس شدة الامواج أو ، بتعبير ادق ، الطاقــة التي تولدها الموجة في كل نقطة . فماذا يعطي قياس هذه الشدة ، التي اسميها ش لتذكركم بأنها شدة وليست عدد جسيمات ؟ لقد رسمت على الشكل ٢٩ المنحني ش٢١ الذي نحصل عليه عندما يكون الثقبان مفتوحين . انه منحن ذو شكل معقد ومهم . فعند تغيير موضع المشعر احصل على شدة تتغير سريعا جدا وبأسلوب خاص . ولا شك أن السبب مألوف لديكم . ذلك أن الامواج تنتشر وهي تتوسع ، وهدة تتلوها صعدة ، بعد مرورها من الثقب ١ ومن الثقب ٢ . ففي النقطة المتساوية البعد عن الثقبين ، حيث تصل الموجتان في لحظة واحدة ، تنضم صعدتاهما معا ونحصل على خفقان شديد في وسط المستوى الذي أضع فيه المشعر . ولو حرفت الآن المشعر جانبيا قليلا بحيث يصبح أقرب الى الثقب ١ ، منه الى الثقب ٢ فان الامواج تستغرق ، للوصول من الثقب ٢ ، وقتا أطول من الوقت

الذي تستغرقه للوصول من الثقب ١ ؛ فعندما تصل الصعدة من الثقب ١ فان الصعدة لا تكون قد وصلت بعد من الثقب ٢ ، بل تكون قد وصلت الوهدة التي امامها . وبذلك فان الماء في النقطة المعتبرة ، وقد وصل اليه معا صعدة من ١ ووهدة من ٢ ، عليه أن يصعد ويهبط في اللحظة نفسها. وبنتيجة ذلك لن يتحرك عمليا ؛ ونحصل على شدة خفقان صغرى في ذلك المكان . واذا ثابرت في نقل المشعر سيحدث فرق زمني كاف كي تصل صعدتان معا ، كل واحدة من ثقب ، بالرغم من أن احداهما تكون متأخرة عن الاخرى بموجة كاملة (اي بصعدة ووهدة) . وعندها نحصل ، من جديد ، على شدة عظمى . وعلى هذا المنوال نحصل على سلسلة من الشدات: صغرى، عظمى، صغرى . . . الخ بحسب «التداخل» الذي يحدث بين الصعدات والوهدات. وهنا أيضا يستعمل العلم كلمة بمعنى غريب . فقد يحدث ما نسميه تداخلا بناء وذلك عندما تتداخل الموجتان لتزيدا في الشدة . والشيء المهم هو ان ش$_{١٢}$ لا تســاوي مجموع ش$_{١}$ و ش$_{٢}$ ، ونقول انهما تعطيان تداخلا بناء أو هداما . ويمكن ان نجد شكلي ش$_{١}$ و ش$_{٢}$ باغلاق الثقب ٢ لوحده فنحصل على ش$_{١}$ ثم باغلاق الثقب ١ فنحصل على ش$_{٢}$. فالشدة التي نحصل عليها ، عندما يكون أحد الثقبين مغلقا ، ناتجة عن الامواج الآتية من الثقب الآخر دون تداخل . والشكل ٢٩ يوضح المنحنيين المذكورين ؛ وتلاحظون عليه ان ش$_{١}$ يشبه ت$_{١}$ وأن ش$_{٢}$ يشبه ت$_{٢}$ لكن ش$_{١٢}$ يختلف كليا عن ت$_{١٢}$.

والواقع ان رياضيات المنحني ش$_{١٢}$ مثيرة جدا . والشيء الصحيح هو أن ارتفاع الموجات ، ولنرمز له بـ ف ، عندما يكون الثقبان مفتوحين يساوي مجموع الارتفاع الذي نحصل عليه لوكان الثقب ١ مفتوحا لوحده مع الارتفاع الآتي لو كان الثقب ٢ مفتوحا لوحـده . وهكذا اذا وصلت وهدة من ٢ فان ارتفاعها سالب ويعدل الارتفاع الموجب الواصل مع الصعدة من ١ . وكان بالامكان الاهتمام بارتفاع الامواج بدلا من شدة خفقانها . لكن الشدة في جميع الاحوال ، في حالة انفتاح الثقبين مثلا ، ليست متناسبة مع الارتفاع بل مع مربع الارتفاع . ولهذا السبب بالذات ، تناسب الشدة مع مربع الارتفاع ، نحصل على هذه المنحنيات المثيرة ، اي :

$$ف_{21} = ف_1 + ف_2$$

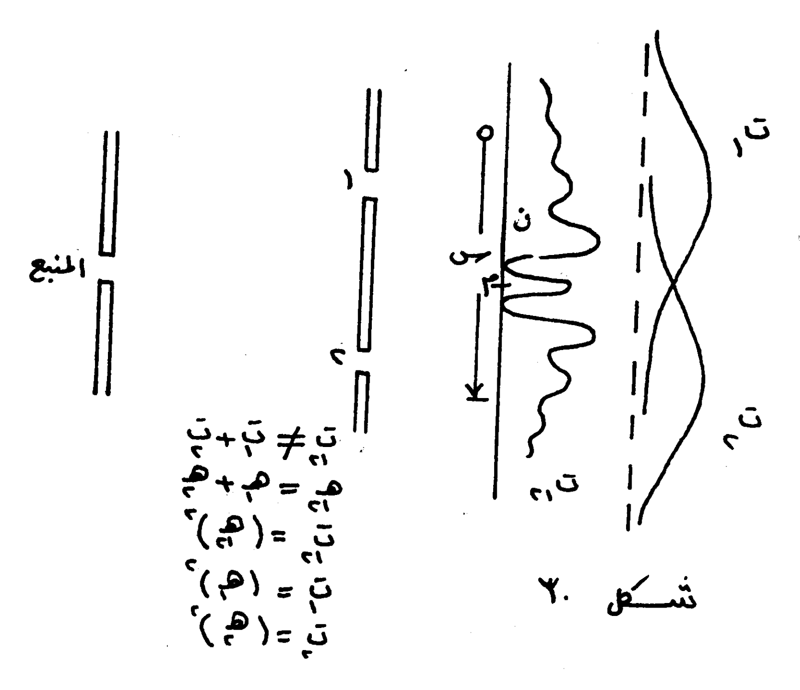
لكن $ش_{21} \neq ش_1 + ش_2$ (تداخل)

$$ش_{21} = (ف_{21})^2$$

$$ش_1 = (ف_1)^2$$

$$ش_2 = (ف_2)^2$$

ذلك هو شأن أمواج الماء . ونبدأ من جديد مع الالكترونات هـذه المرة (شكل ٣٠)



شكل ٣٠

المنبع سلك خيطي ساخن جدا تنبعث منه الكترونات . الالواح ذات الثقوب من التنغستين . والمشعر ، أي تركيب كهربائي يفي بالغرض اذا كان حساسا لدرجة تشعر بشحنة الكترون واحد مهما كانت طاقته . واذا كنتم تفضلون ، يمكن استعمال فوتونات وحواجز من ورق اسود . ــ الواقع ان الورق الاسود غير ملائم لان اليافة لاتجعل الثقوب منتظمة .

ومن الاحسن استخدام مضاعف فوتوني كمشعر وهو يكشف وصول الفوتونات افراديا . ماذا يحدث في هذه الحالة او تلك ؟ لن أناقش سوى حالة الالكترونات لان حالة الفونونات تماثلها تماما .

ان ما يسجله المشعر المجهز بمضخّم قوي هي تكات « تك ، تك » أي وحدات صحيحة . فسماع التكة معناه شدة معينة ثابتة لكل تكة . وعندما يكون المنبع ضعيفا فان الفواصل الزمنية بين التكات تكون طويلة لكن التكة تحتفظ بشدتها . وعندما يقوى المنبع فان تواتر التكات يصبح كبيرا ، وينتهي الامر بازدحام المضخم . وعلى هذا الاساس يجب احكام المنبع بحيث لايعطي تكات يعجز التركيب المشعر عن تعدادها . وبعد اتخاذ هذه الاحتياطات ، اذا وضعتم مشعرا ثانيا في مكان أخر فلن تسمعوا تكتين معا اذا كان المنبع ضعيفا لدرجة كافية وكان الجهاز الذي يقيس الفترة الزمنية بينهما دقيقا . وباختصار ، اذا كان تواتر اصدار المنبع للالكترونات صغيرا (شدة المنبع صغيرة) فلن يحدث ابدا تكتان معا ، كل تكة في مشعر . وهذا يعني أن الامور تتجلى بشكل وحـدات من حجم واحد معين ، لا يمكن أن تحدث الا في مكان واحد لحظة حدوثها . وهكذا تتجلى الالكترونات ، او الفوتونات ، فردا فردا . اي اننا سنكون ازاء سلوك كسلوك الرصاصات .

نقوم اذن بتنقيل المشعر من نقطة لاخرى في مستوى اللوح الثالث الاخير — ويكون من الاحسن أن نوزع عددا كبيرا من المشعرات في مختلف نقاط هذا اللوح معا ونرسم عندئذ المنحني دفعة واحدة ، لكن ذلك يكلف غاليا — ونتركه في كل نقطة مدة ساعة واحدة مثلا . وفي نهاية التجربة ، يتم احصاء عدد الالكترونات (عدد التكات) الواصلة الى كل نقطة خلال ساعة . وقد نعيد هذه التجربة مرات عديدة فنحصل من أجل كل نقطة على عدد وسطي . ماذا نجد بشأن هذه الاعداد الوسطية للالكترونات؟ هل نجد شيئا يشبه ما وجدناه من أجل ت١٢ في تجربة الرصاصات ؟ ان

الشكل ٣٠ يبين ما نحصل عليه عندما يكون الثقبان مفتوحين ، ونرى عليه أن الطبيعة تعطي منحنيا يشبه الذي حصلنا عليه في حالة أمواج متداخلة. فلماذا تعطي الطبيعة هذا المنحني ؟ ان هذا المنحني لا يمثل ، وضوحا ، توزع طاقة الامواج بل احتمال وصول الالكترونات .

والرياضيات هنا بسيطة . بدلوا ش ب ت ؛ وهذا يستدعي ان تبدلوا ف بشيء جديد مختلف ــ شيء ليس ارتفاعا ــ ؛ لنخترع مقدارا هـ ، يمكن ان نسميه سعة الاحتمال لاننا لانعلم ماذا يمثل . وعندها نسمي هـ١ سعة احتمال الوصول من الثقب ١ ونسمي هـ٢ سعة احتمال الوصول من الثقب ٢ . والسعة الكلية لاحتمال الوصول نحصل عليها من جمع هاتين السعتين . انها محاكاة مباشرة لما يحدث مع الامواج لاننا نحصل هنا على المنحني نفسه الذي حصلنا عليه هناك ، ولذا نستعمل الرياضيات نفسها .

ويجب هنا ان اتاكد من شيء حصل في حالة التداخل . فانا لم اتحدث عما يحدث لو اغلقت احد الثقبين . لنحاول تحليل هذا المنحني ، ت١٢ ، مفترضين أن الالكترونات تأتي من احد الثقبين فقط . لنغلق الثقب ٢ ولنحص الالكترونات التي تأتي من الثقب ١ : تدل التجربة أننا نحصل على المنحني البسيط ت١ . ولو اغلقنا الثقب ١ وفتحنا الثقب ٢ لحصلنا على المنحني المماثل ت٢ . لكن حالة انفتاح الثقبين معا لا يقابلها ت١ + ت٢ ، بل تقود الى تداخل . والواقع أن رياضيات هذه الحالة تتصف بهذه الصيغة التي تظهر احتمال الوصول على شكل مربع سعة هي بدورها مجموع سعتين ، أي ت١٢ = (هـ١ + هـ٢)٢ .

لكن سؤالا يبرز هنا : بما ان الالكترونات تتوزع بشكل معين عندما تمر من الثقب ١ ، وبشكل مماثل عندما تمر من الثقب ٢ ، فلماذا لانحصل على مجموع هذين التوزعين عندما نفتح الثقبين معا ؟ لماذا ، مثلا ، لا يسجل المشعر عمليا أي شيء عندما نضعه في النقطة ن والثقبان مفتوحان كلاهما ؟ بينما نراه يسجل عددا كبيرا من الالكترونات عندما اغلق الثقب ٢ وعددا

لابأس به عندما اغلق الثقب ١ . اليس عجيبا ان ينقطع الوصول الى ن عدما افتح الثقبين معا ؟ خذوا ايضا قضية الوصول الى النقطة المركزية م وستجدون عجيبة اخرى ! ستجدون أن عدد الالكترونات التي تصل اليها ، والثقبان مفتوحان معا ، يفوق مجموع عددي الالكترونات التي تصل من الثقبين كلا على حدة . قد تظنون بأنفسكم القدرة ، بما يكفي من الخيال ، على اختراع تفسير لهذه العجائب : كأن تقولون بأن الالكترونات تذهب وتمضي على هواها عبر الثقوب ، أو أنها تتكسر الى قطعتين تمران معا من خلال الثقبين ، أو شيئا اخر من هذا القبيل . لكن لم ينجح احد في اعطاء تفسير مرض لهذه العجائب ، فرياضياتها بسيطة والمنحني كذلك بسيط (شكل ٣٠) .

وباختصار أقول : ان الالكترونات تصل فردا فردا كجسيمات ، لكن احتمال وصولها يتعين كما تتعين سعة موجـة . وبهذا المعنى يتصرف الالكترون كجسم تارة وكموجـة تارة اخري ، اي باسلوبين مختلفـين في وقت معا (شكل ٣١) .

رصاصات الرشاش	أمواج على الماء	الكترونات ، فوتونات
تصل فردا فردا	تصل بأية مقادير	تصل فردا فردا
قياس احتمال الوصول ت٢١ = ت١ + ت٢	قياس شدة الامواج ش٢١ ≠ ش١ + ش٢	قياس احتمال الوصول ت٢١ ≠ ت١ + ت٢
لا يحدث تداخل	يحدث تداخل	يحدث تداخل

شكل ٣١

ذلك كل مايقال . ويمكن ان اعطي صيغة رياضية تسمح بايجاد احتمال وصول الالكترونات في كل الظروف ـ فيما عدا ان سلوك الطبيعة هذا يخفي وراءه العديد من الالغاز . فهناك جوانب طريفة وأريد أن أناقشها لانها ، وقد وصلنا الى هذه النقطة من الحديث ، ربما لاتبدو واضحة .

ونبدأ بمناقشة هذه الالغاز على أساس فكرة قد تبدو لنا معقولة لان هذه الجسيمات تصل فردا فردا . فبما أننا ازاء جسم منفرد صحيح ، الالكترون هنا ، نستقبله فمن المعقول طبعا أن نفترض أن كل الكترون يمر من خلال الثقب ١ أو من خلال الثقب ٢ . وهذه الفرضية تبدو منطقية لان الالكترون ، كوحدة قائمة بذاتها ، لايمكن أن يفعل غير ذلك . وبما انني سأناقش هذه الفكرة فلا بد من اعطائها اسما . وسوف اسميها « الاقتراح ب » :

كل الكترون يمر اما من الثقب ١ أو من الثقب ٢

لكننا قد بدأنا فعلا بمناقشة مضمونات هذا الاقتراح . فلو صح أن الالكترون اما أن يمر من الثقب ١ أو من الثقب ٢ فيمكن تحليل العدد الكلي للالكترونات كمجوع اسهامين . سيكون هذا العدد الكلي مجموع الالكترونات المارة من الثقب ١ مع الالكترونات المارة من الثقب ٢ . لكن ؛ بما أن المنحني المحصول عليه تجريبيا ، في حالة انفتاح الثقبين معا ، لا يمكن تحليله بهذه البساطة كمجموع المنحنيين الناتجين عن الثقبين كلا على حدة فعلينا أن نستنتج اذن أن الاقتراح **ب** خاطىء . فاذا لم يكن صحيحا أن الالكترون اما أن يمر من الثقب ١ أو من الثقب ٢ فقد يكون أنه ينقسم مؤقتا الى جزئين ، أو شيء آخر . لكن القول بخطأ الاقتراح **ب** هو من المنطق المحض . وسواء كان ذلك مؤسفا أم لم يكن ، فان التجربة تسمح لنا بوضع المنطق على المحك . فعلينا أن نكتشف اذا كان حقا ، أو لا ، ان الالكترونات اما ان تمر من الثقب ١ أو من الثقب ٢ ، أو انها تتجول من ثقب الى آخر ، أو انها تتجزأ مؤقتا ، أو شيء آخر .

يكفي أن ننظر اليها ! ولكي نراها لا بد من اسقاط نور عليها . ولهذا الغرض نضع بين الثقبين منبع نور قوي . يصطدم الضوء عندئذ بالالكترونات وينزو عنها ؛ فيمكن أن نرى الالكترونات اذا كان النور شديدا لدرجة كافية . نقف على بعد قليل ونرصد ، عندما يسجل العداد الكترونا (أو مباشرة قبل أن يسجله) اذا كنا نرى التماعا ضوئيا

وراء الثقب ١ أم وراء الثقب ٢ . أو ربما نصف التماع وراء كل من الثقبين معا . وبهذا الفحص سنتمكن أخيرا من معرفة سير الامور . لنشعل الضوء وننظر : جميل جدا ! كلما سجل المشعر وصول الكترون نرى التماعا واحدا وراء أحد الثقبين فقط . وهكذا نتأكد ان الالكترون يمر بكامله مائة في المائة اما من الثقب ١ أو من الثقب ٢ . أمر عجيب !

لنزنق الطبيعة . لنضع في طريقها المصاعب . واليكم كيف نفعل ذلك . ندع النور مشتعلا ونرصد ونعد الالكترونات التي تمر من الثقبين. ولنرتب جدولا بعمودين احدهما للثقب ١ والثاني للثقب ٢ ؛ فعندما يسجل المشعر وصول الكترون نسجل علامة في عمود الثقب الذي مر منـه . كيف يكون عندئذ شأن العمود المتعلق بالثقب ١ اذا فحصت الحصيلة من أجـل عدة أوضاع للمشعر ؟ احصـل على المنحني $ت_{١}$ (شكل ٣٠) . فحصيلة هذا العمود تعطي ، اذن وتماما ، التوزع الذي حصلت عليه لدى اغلاق الثقب ٢ . والنتيجة انني احصل على التوزع نفسه تماما سواء رصدت أم لم أرصد . فلدى اغلاق الثقب ٢ احصل على توزع وصول يماثل التوزع الذي احصل عليه عندما ارصد الثقب ١ . كما أن عـدد الالكترونات التي رأيناها تمر من الثقب ٢ يعطي المنحني البسيط نفسه $ت_{٢}$. والآن **يجب أن يكون** العـدد الكلي للالكترونات مجموع الاثنين ، يجب أن يكون مجموعَ العـدد $ت_{١}$ مع $ت_{٢}$ ، لان كل الكترون قد أحصي اما في العمود ١ أو في العمود ٢ . ان عدد الوصولات **يجب لزاما** ان يكون مجموع هذين العددين ، ويجب أن يكون موزعا مثل $ت_{١} + ت_{٢}$ لكنني قلت انه موزع بموجب المنحني $ت_{٢١}$ ؟ كلا ، انه موزع بموجب $ت_{١} + ت_{٢}$. انه كذلك حقا وبالتأكيد : يجب ان يكون كذلك وانه لكذلك . فلو أشرنا « بفتحة » الى النتائج الحاصلة مع النور لوجدنا أن $تَ_{١}$ يساوي عمليا $ت_{١}$ وأن $تَ_{٢}$ يساوي عمليا $ت_{٢}$. لكن العدد $تَ_{٢١}$ ، الذي وجدناه مع النور والثقبان مفتوحان **يكون** مساويا مجموع العدد الملاحظ لدى المرور من الثقب١ مع العدد الملاحظ لدى المرور من الثقب٢. ذلك ما نحصل عليـه عندما يكون النور مشتعلا . وهكذا نحصل على جوابين مختلفين حسبما يكون النور مشتعلا أو لا يكون . فاذا أشعلت

النور احصل على التوزع $ت_{١}$ + $ت_{٢}$ واذا اطفأته احصل على التوزع $ت_{٢١}$. واشعله ثانيا فاحصل على $ت_{١}$ + $ت_{٢}$ من جديد . وهكذا ترون ان الطبيعة لم تقع في الفخ الذي نصبناه لها ! يمكن أن نقول ان النور قد غيَّر النتيجة . فهو ، باشتعاله وانطفائه يعطي نتيجتين مختلفتين . ويمكن ان اقول أيضا ان النور يؤثر في سلوك الالكترونات . فاذا اعتبرت حركة الالكترونات أثناء التجربة (رغم ان هذا التعبير غير مناسب تماما) امكن ان نقول ان النور يؤثر في هذه الحركة ويجعل ذلك العدد من الالكترونات، التي كانت يمكن أن تصل الى نقطة الشدة العظمى ، تنحرف تحت ضربات الضوء وتصل عمليا الى نقطة الشدة الصغرى ، فتعدل المنحني $ت_{٢١}$ لتعطي المنحني $ت_{١}$ + $ت_{٢}$.

ان الالكترونات كائنات ناعمة سهلة الانفعال . فلو رصدتم كرة قدم بعد انارتها فان سلوكها لن يتغير وستتابع مسيرها كأن شيئا لم يحدث . لكنكم اذا أنرتم الكترونا فانه يتصرف كأن شيئا قد صدمه ويغير سلوكه اذا كان النور شديدا جدا . افترضوا أننا نحاول أن نحجب النور أكثر فأكثر حتى يصبح ضعيفا جدا ، ثم نستعمل مشعرات حساسة جدا تسمح بالرصد في هذا النور الضعيف جدا . اذا ضعف النور تدريجيا فلا تتوقعوا أن هذا النور الضعيف ، مهما اشتد ضعفه ، سيؤثر في الالكترون فيغير توزعه مائة في المائة من $ت_{٢١}$ الى $ت_{١}$ + $ت_{٢}$. لكن عندما يصبح النور ، بشكل او بآخر ، اضعف فأضعف فان النتيجة يجب أن تقترب اكثر فاكثر من تلك التي نحصل عليها في الظلام . ولكن كيف ستتحول المنحنيات من شكل لآخر ؟ الواقع ان النور ليس ، بالتأكيد ، شيئا يطابق الموجة على الماء . فهو يتجلى أيضا بشكل وحدات ذات خواص جسيمية تسمى فوتونات . وعندما يضعف النور لا يضعف تأثيره بل ينقص عدد الفوتونات الآتية من المصباح ؛ فكلما ضعف النور تناقص عدد الفوتونات . فاذا كان يوجد عدد قليل من الفوتونات فقد يحدث أن الالكترون يمر من الثقب دون ان يلتقي فوتونا فلا أراه . فالنور الضعيف ليس معناه حدوث اضطراب أضعف للالكترون بل وجود عدد ضئيل من الفوتونات . فاستخدام نور ضعيف يستدعي تنظيم عمود

ثالث في الجدول تحت عنوان « لا أراه » . فعندما يكون النور شديدا لا يحوي هذا العمود سوى عدد صغير من الالكترونات . لكن في النور الضعيف جدا تتسجل غالبية الالكترونات فيه . وهكذا ستحزرون ما سأجد في حصيلة هذه الاعمدة الثلاثة : رقم ١ ، رقم ٢ ، « لا أراه » . سأجد أن الالكترونات ، التي أراها ، تتوزع بموجب ت١ +ت١ ، أما التي لا أراها فتتوزع بموجب ت٢١ . وكلما أضعفت الضوء أرى أعدادا أقل فأقل ويزدحم عمود « لا أراه » . وفي جميع الاحوال يكون المنحني الحقيقي مزيجا من ت١ + ت٢ و ت٢١ ، حتى يصبح نهائيا وبالتدريج ، عندما يحل الظلام ، مماثلا لـت٢١ .

هذا ويستحيل علي أن أناقش هنا كل ما يمكن أن تقترحوه لرصد الثقب الذي يمر منه الالكترون . لكن من المؤكد انه يستحيل أن نرتب النور بحيث نستطيع تعيين الثقب الذي يمر منـه الالكترون دون أن يشوش ذلك توزع وصول الالكترونات ، دون أن يخرب التداخـل . والواقع ، سواء استعملتم النور أو أي شيء آخر فمن المستحيل مبدئيا أن تتوصلوا الى ذلك . ويمكنكم ، اذا أردتم ، أن تبتكروا وسائل عديدة لمعرفة الثقب الذي يمر منه الالكترون ، وسيمر حتما من هذا الثقب او ذاك . ولكن لو حاولتم تركيب جهاز لا يشوش في الوقت ذاته حركة الالكترون فستجدون انكم لن تستطيعوا أن تقولوا من أي ثقب قد مر ، وستصلون الى النتيجة المعقدة ذاتها .

لقد لاحظ هايزنبرغ ، عندما اكتشف ميكانيك الكم ، أن قوانين الطبيعة الجديدة هذه لن تكون متناسقة الا اذا كانت امكانياتنا التجريبية ذات حدود أساسية (لا سبيل الى تجاوزها) لم تكن معترفا بها حتى ذلك الوقت . وبتعبير آخر ، ليس بالامكان اجراء تجربة بالدقة الكبيرة التي نريد . وقد أصدر هايزنبرغ مبداه المعروف بمبدأ الارتياب والذي، في تجربتنا الخاصـة ، يمكن أن يلفظ كما يلي (لقد أعطى نصـا آخر ولكنه يكافىء تماما النص التالي ، واحدهما مرتبط بالآخر) : « ان من المستحيل تصور جهاز ، مهما كان ، يسمح بتعيين الثقب الذي يمر منه

الالكترون دون أن نشوش ، في الوقت ذاته . ذلك الالكترون لدرجة تكفي لتخريب صورة التداخل » . ولم يستطع انسان بعدُ أن يتحاشى ذلك . انني متأكد انكم تتلهفون على ابتكار طرائق تشعرون بواسطتها من اي الثقبين قد مر الالكترون ، ولكن لو حللنا بعناية كلا من هذه الطرائق فسنكتشف دوما وجود مشكلة . ولو ظننتم أنكم تستطيعون ذلك دون تشويش الالكترون فسيبرز لكم دوما شيء ما ، وسوف يتفسر دوما الفرق بين المنحنيين ت٢١ و ت١ + ت٢ بالتشويش الناجم عن الاجهزة المستعملة لتعيين الثقب الذي عبر منه الالكترون .

ان هذا المبدأ خاصية أساسية من خواص الطبيعة وذو شمول عالمي . وحتى لو اكتشفنا غدا جسيما جديدا ، الكاؤون (الواقع أن هذا الجسيم قد اكتشف ، وما دمنا نبحث عن اسم فليكن هذا) واستعملنا التفاعل بين الكاؤونات والالكترونات لنعرف الثقب الذي مر منه الالكترون ، فأنا أعلم سلفا — أو على الاقل آمل ذلك — ما يكفي عن سلوك هذا الجسيم كي أؤكد هذا : ان خواصه لا يمكن أن تكون بحيث تتيح تعيين الثقب الذي عبر منه الالكترون دون أن تشوش ، في الوقت نفسه ، هذا الالكترون لدرجة تكفي لتحويل صورة التداخل الى صورة دون تداخل . وهكذا يمكن استخدام مبدأ الارتياب كمبدأ عام يسمح بتصور مسبق للعديد من خواص الجسيمات المجهولة . فهذا المبدأ يحد من معقولية خاصياتها .

لنعد الى اقتراحنا ب : « ان الالكترونات تمر اما من هذا الثقب واما من ذاك » . هل هو صحيح أم لا ؟ ان للفيزيائيين وسيلة لتحاشي الفخاخ التي يصادفونها . فهم يتبنون قواعد التفكير التالية . اذا كان لديكم جهاز قادر على تعيين الثقب الذي يمر منه الالكترون (ويمكن الحصول على جهاز كهذا) امكنكم أن تقولوا انه قد مر من هذا الثقب أو ذاك . وهذا ما يفعله : يعبر بالفعل احد الثقبين — حين ترصدونه . لكن اذا لم يكن لديكم جهاز قادر على ذلك فلن تستطيعوا أن تقولوا أي الثقبين عبر منه الالكترون . وبتعبير أصح ، تستطيعون أن تقولوا ذلك

شريطة أن تتوقفوا عن التفكير وعن استخلاص النتائج . لكن الفيزيائيين يفضلون ان لا يقولوه على التوقف عن التفكير ولو للحظة واحدة . واستنتاج أن الالكترون قد مر بهذا الثقب أو ذاك ، عندما لا نترصده ، يقود الى تنبؤات خاطئة . ذلك هو السلوك المنطقي الحرج الذي يجب أن نسلكه لتفسير الطبيعة .

والاقتراح الذي أناقشه هنا هو فكرة عامة لا تقتصر على حالة الثقبين . ويمكن أن ننص عليها كما يلي : ان احتمال وقوع حادث ، في تجربة مثالية ــ أي تجربة نحدد ظروفها بأحسن ما يمكن ــ هو مربع مقدار ، أسميته هـ ، أي سعة الاحتمال . فاذا كان يمكن لهذا الحادث أن يقع بعدة أساليب متنافية(١) فان سعة احتمال وقوعه الكلية هـ هي مجموع سعات احتمال وقوعه بكل من الاساليب الاخرى (هـ = هـ١ + هـ٢ + ٠٠٠) . لكن لو اجرينا تجربة تسمح بتعيين اي أسلوب هو الذي حصل فان احتمال وقوع الحادث يتغير ؛ انه عندئذ مجموع احتمالات كل من الاساليب (ف = ف١ + ف٢ + ٠٠٠) . اي أننا عندئذ نخسر التداخل .

يمكن الآن أن نتساءل كيف تسير الامور حقا بحد ذاتها . ما هي الآلية التي تتم بشكلها الطبيعي ؟ الواقع أنه لا يعرف أحد أية آلية . لا يمكن لاحد أن يعطيكم ، لهذه الظاهرة ، تفسيرا أعمق من تفسيري ــ وهو ليس سوى وصف . يمكن اعطاؤكم شرحا أعم ، يغطي حوادث أكثر عددا ، ليثبت لكم استحالة تعيين الثقب الذي مر منه الالكترون دون أن يحدث ، في الوقت نفسه ، تخريب لصورة التداخل . يمكن أن يوصف لكم صنف من التجارب أوسع بكثير من تجربة الثقبين لوحدها . سيكون

---

(٢) أي أن كل اسلوب يمكنه لوحده ان يؤدي الى وقوع الحادث المطلوب ، وأن حصول أسلوب بذاته ينفي حصول أي من الاساليب الاخرى . فوصول الالكترون الى المشعر (الحادث) يمكن أن يحصل عبر الثقب ١ (اسلوب اول) أو عبر الثقب ٢ (اسلوب ثان) . وعبور الكترون معين من احد الثقبين ينفي عبوره من الثقب الآخر .
(المترجم)

ذلك أوسع شمولا ولكن ليس اكثر عمقا . ويمكن جعل الرياضيات اكثر صلاحا بافهامكم ان الاعداد المستعملة ليست اعدادا حقيقية بل عقدية ، او اية تدقيقات أخرى ليس لها اية صلة بالفكرة الاساسية . لكن اللغز كامن في الشيء الذي وصفت ولم يتمكن انسان ، حتى اليوم ، من الذهاب الى ابعد من ذلك .

هذا واننا حسبنا حتى الآن احتمال وصول الالكترون . لكن يمكن ان نتساءل عن وجود وسيلة لمعرفة متى يصل الالكترون الفرد حقا . فنحن لسنا بالتاكيد ضد استعمال نظرية الاحتمالات ، اي حساب الفرص والحظوظ في ظروف معقدة . عندما نقذف نردا في الهواء فاننا ، بسبب شتى المقاومات والذرات والاشياء المعقدة الاخرى ، مهيأون لان نقبل اننا لا نملك معرفة ما يكفي من التفاصيل كي نصدر نبوءة دقيقة . فنحسب اذن فرص حصول هذه النتيجة او تلك . لكن الذي نقوله هنا ــ أليس كذلك ؟ ــ هو أن الاحتمالات موجودة منذ البدء : ان الصدفة موجودة في القوانين الاساسية للفيزياء .

افترضوا انني ركّبت تجربتي بحيث احصل على صورة تداخل عندما يكون النور مطفئا . وهنا ازعم انني ، حتى في وجود النور ، لن اتمكن من التنبؤ عن رقم الثقب الذي سيمر منه الالكترون ؛ اي لا سبيل للتنبؤ بذلك مسبقا . وبتعبير آخر ، لا يمكن التنبؤ عن المستقبل ؛ فلا يمكن بصورة من الصور ، مهما كانت المعلومات التي بحوزتي ، أن أتنبأ من اي ثقب سيمر الالكترون أو وراء اي ثقب سأراه . وهذا يعود الى القول ، بمعنى معين ، ان الفيزياء قد هجرت هدفها الاولي (لو كان ذلك هو حقا هدفها الاولي) الذي يعتقده الناس ، وهو استحصال المعلومات الكافية لامكانية التنبؤ عما يحدث في ظروف معينة . ان الظروف موجودة : منبع الكترونات ، منبع نور قوي ، لوح من التنغستين ذو ثقبين ؛ فقولوا لي وراء اي ثقب سوف ارى الالكترون ؟ يوجد نظرية تقول بأن استحالة معرفة الثقب الذي سيمر منه الالكترون ناجمة عن آليات معقدة على مستوى المنبع . فكأنه يوجد دواليب ومسننات

و . . . الخ ، وهي التي تعين ثقب العبور ، والاحتمال هو عندئذ نصف ـ نصف لان الصدفة تتدخل كما في النرد : اي ان الفيزياء ، في رأيهم ، ناقصة . ولو كان لدينا فيزياء تامة بما فيه الكفاية لأمكن التنبؤ عن ثقب العبور . ان هذا الرأي يسمى نظرية « المتحولات الخفية » . ان هذه النظرية لا يمكن أن تكون صحيحة ، وليس نقص المعلومات التفصيلية هو الذي يمنع امكانية التنبؤ .

قلت انني اذا أشعلت النور أحصل على صورة تداخل . ففي كل الظروف التي يحدث فيها تداخل ، يستحيل تحليل هذا التداخل بعبارات العبور اما من الثقب ١ أو من الثقب ٢ لان منحني التداخل ببساطته يختلف رياضيا تماما عن مجموع منحنيي الاحتمال . فلو كنا استطعنا أن نعين مسبقا الثقب الذي سيعبر منه الالكترون عندما يكون النور مشتعلا لما كان لاشتعاله أو عدمه أي دخل هنا . لو كانت آلية منبع الالكترونات ، رغم تنوعها ، يمكن ان تنبيء لوحدها عن الثقب الذي سيمر منه الالكترون لامكننا التنبؤ بذلك دون نور ، وعندها سيكون المنحني الكلي مساويا مجموع المنحنيين المتعلقين بالثقبين كلا على حدة ؛ لكن الواقع ليس كذلك . يجب اذن أن يكون من المستحيل المعرفة المسبقة للثقب الذي سيمر منه الالكترون سواء كان النور مشتعلا أم لا وذلك في الظروف التجريبية التي تعطي صورة تداخل لدى انطفاء النور . فليس اذن جهلنا بالالية وتعقيداتها هو الذي يسبب ظهور الاحتمالات في الطبيعة . يبدو أن ذلك جوهري ، وهذا ماعبر عنه احدهم بقوله : « ان الطبيعة نفسها لاتدري من أي ثقب سيمر الالكترون » .

قال احد الفلاسفة مرة : « لكي يوجد علم يجب دوما أن تؤدي نفس الاسباب الى نفس النتائج » . ليس هذا مايحدث هنا . فانتم تركبون التجربة في الشروط ذاتها ولاتستطيعون التنبؤ في أي ثقب سترون الالكترون . لكن العلم يستمر معذلك وبالرغم من أن نفس الاسباب لا تؤدي الى نفس النتائج . وبالطبع يزعجنا كثيرا أن لانستطيع التنبؤ بما سيحدث بالضبط . يمكن أن نتصور ، جدلا ، حدوث ظروف خطيرة جدا تجد

البشرية نفسها **بحاجة** لان تعرف ، ولكنها لايمكن مع ذلك أن تتنبأ بشيء.
ولنفترض مثلا أننا ركبنا جهازا ـ من الافضل أن لانفعل ، لكن ذلك ممكن ـ فيه خلية فوتوكهربائية تسجل مرور الالكترون ، وعندما يعبر الثقب ١ تشعل قنبلة ذرية والحرب العالمية الثالثة ، لكن عندما يعبر الثقب ٢ تبدأ محادثات سلام ويبتعد خطر الحرب . وهكذا يتوقف مستقبل البشرية على شيء لايتنبأ به أي علم . لايمكن التنبؤ بالمستقبل .

والشيء الضروري « لوجود العلم نفسه » ـ وماهي خواص الطبيعة ؟
ـ لايمكن أن يتوقف على آراء مسبقة مبهرة بل يحدده دوما الفرض المادي لعملنا ، تحدده الطبيعة نفسها . فنحن نهتم بما يحدث امامنا ولا نستطيع منطقيا أن نعرف سلفا كيف سيحدث . وغالبا مايحصل أن الامكانيات الاكثر عقلانية ليست هي التي تحدث فعلا . والمتطلبات اللازمة لتقدم العلم هي القدرة على التجريب والنزاهة في نقل النتائج ـ يجب أن لانعطي كنتائج ، ما كنّا نرغب في أن نجده بل ما وجدناه فعلا ـ واخيرا ، وهذا اساسي ، الذكاء في تفسير النتائج . والخاصة المهمة في هذا الذكاء هي أن لايحاول الحكم مسبقا على مالم يقع . فقد يخطر لهذا الذكاء أن يفكر أن « هذا غير محتمل أبدا ، انه لا يروقني » . لان الراي المسبق ليس اليقين المطلق . ونحن لا نعارض الميول الفكرية طالما بقيت ميولا ، ولا خطر منها ؛ لان الميول الخاطئة لاتلبث ، تحت وطأة تراكم النتائج التجريبية ، أن تزعج صاحبها حتى لا يبقى له مناص من أخذ هذه النتائج بعين الاعتبار ؛ ولا يجوز أن نضرب صفحا عنها الا اذا كنا على يقين مطلق من قواعد لا بد للعلم من أن يحترمها سلفا . والحقيقة أن الشيء الضروري لوجود العلم هي عقول لا تقبل أن تفرض على الطبيعة شروطا مسبقة ، كشروط ذلك الفيلسوف .

٧

طرائق البحث عن قوانين جديدة

ان موضوع هذه المحاضرة لـن يكون بالتحديـد خواص القوانـين الفيزيائية . وقد يظن ، على الاقل ، انني أتكلم عن الطبيعة عندما أتكلم عن خواص القوانين الفيزيائية ؛ لكنني لا اريد الكلام عن الطبيعة بل عن الوضع الذي نحتله حاليا بالنسبة لها : أي مانعتقد أننا نعرفه ومابقي علينا ان نحزره وكيف نتدبر امرنا لكي نحزره . لقد اقترح احدهم أن الشيء المثالي هو أن أشرح في كل مناسبة من محاضراتي كيف نحزر قانونا وأن أحاول خلق قانون جديد امامكم . لكنني لست أدري اذا كنـت قادرا على ذلك .

اريد ، باديء ذي بدء ، أن أشرح لكم الوضع الحالي ، الاشياء التي نعرفها في الفيزياء . فقد تظنون انني ، وقد شرحت لكم في محاضراتي السابقة كل المباديء الكبرى المعروفة ، قد قلت لكم كل شيء . لكـن المباديء يجب تطبيقها على شيء ما . فمبدأ انحفاظ الطاقة يشير الى طاقة شيء ما ، وقوانين الميكانيك تسيطر على شيء ما ــ وهذه المباديء بمجموعها لاتنبيء دوما عن محتوى الطبيعة التي نتكلم عنها . وعلى هذا سأتحدث لكم قليلا عما هو مفروض أن تتناوله هذه المباديء .

قبل كل شيء يوجـد المادة ــ والرائع هو انه لا يوجـد سوى مادة واحدة . والمادة التي تتشكل منها النجوم ، نعرف انها نفس المادةالموجودة

على الارض . وخواص الضوء الصادر عن النجوم تشكل نوعا من البصمات التي تسمح لنا بالقول بأننا نجد هناك نفس انواع الذرات الموجودة في المخلوقات الحية والمخلوقات العاطلة عن الحياة : فالضفادع مصنوعة من نفس المواد الاولية المصنوعة منها الصخور ، ولا تختلف الا بالترتيب . وهذا يسهل المسألة ، لاشيء سوى الذرات في كل مكان .

والذرات ، كما تبدو ، لها جميعا تركيب عام واحد : نواة ، وحول النواة الكترونات . ويمكن ان نعمل قائمة بالعناصر التي نعتقد بمعرفتنا لها في العالم (شكل ٣٢) .

الالكترونات	النترونات
الفوتونات	البروتونات
الغرافيتونات	
النترينوات	
+ الجسيمات المضادة	

شكل ٣٢

يوجد أولا الالكترونات وهي جسيمات تقع في المنطقة الخارجية من الذرة ثم النوى : نعلم اليوم أنها ، هي نفسها ، مؤلفة من جسيمين عنصريين آخرين . ولو نظرنا الى النجوم والى الذرات نراها تصدر ضوءاً ، وهذا الضوء نفسه يتألف من حبيبات تسمى فوتونات . وفي البدء تحدثت عن التثاقل ؛ واذا كانت النظرية الكمومية صحيحة فان التثاقل يجب أن ينتج انواعا من الامواج تتصرف أيضا كالجسيمات هي الغرافيتونات [1] . واذا كنتم لا تصدقون فسموها الثقلة . وقد تحدثت لكم أيضا عما نسميه الاصدار بيتا حيث يصدر نترون يتفكك بدوره الى بروتون والكترون

(١) ان كلمة غرافيتون مشتقة لفظا من الكلمة الاجنبية التي ترجمناها الى كلمة تثاقل . ولو اردنا أن نشتق ، بطريقة مماثلة ، اسما عربيا لهذا الجسيم لاسميناه ثِقلة . (المترجم)

ونترينو ـ او بالضبط نترينو مضاد ؛ وهكذا يكون لدينا جسيم آخر هو النترينو . وبالاضافة الى جميع الجسيمات الواردة في القائمة يوجدطبعا الجسيمات المضادة ، وليست هي سوى وسيلة سريعة لمضاعفة عدد الجسيمات ولكنها لاتثير اية مشكلة .

وبواسطة الجسيمات الواردة في القائمة يمكن شرح جميع ظواهر الطاقة المنخفضة ، أي واقعيا كل الظواهر الشائعة التي تحدث في كل مكان في الطبيعة ، او ما نعرفه عن هذه الظواهر . وهنا نستثني الحالة التي يظهر فيها جسيم ذو طاقة عالية . وقد أمكن في المخبر الحصول على اشياء غريبة . ولكن اذا تركنا هذه الحالة الخاصة جانبا امكن شرح كل الظواهر الشائعة بفعل هذه الجسيمات وحركاتها ـ الحياة مثلا يقال ، مبدئيا ، بامكانية شرحها بحركة الذرات ، هذه الذرات المؤلفة من نترونات وبروتونات والكترونات . ويجب أن اضيف راسا : عندما نقول اننا نفهم مبدئيا فهذا يعني بكل بساطة أننا لو استطعنا حساب كل شيء لاكتشفنا انه لم يبق شيء جديد نكتشفه في الفيزياء كي نفهم ظواهر الحياة .

مثال آخر . ان اصدار الطاقة من النجوم ، الطاقة الشمسية أو النجمية ، يمكن على الارجح تفسيره أيضا باعتبارات التفاعلات النووية بين الجسيمات . فكل تفاصيل سلوك الذرات تتفسر بدقة بهذا النوع من النموذج ، في الوضع الحالي لمعلوماتنا على الاقل .

والحقيقة ، يمكن أن أقول انه ، في حقل الظواهر الحالي ، لايوجد على حد معرفتي ظاهرة لايمكن يقينا شرحها بهذه الصورة ، أو حتى ظاهرة ذات لغز عميق .

ولم يكن الامر كذلك دوما . فقد كان يوجد مثلا ظاهرة تسمى الناقلية العليا ، وتتلخص في أن المعادن تنقل ، في درجات الحرارة المنخفضة ، الكهرباء دون مقاومة . ولم يكن واضحا ، لاول وهلة ، أن هذه نتيجة للقوانين المعروفة . ولكن بعد تفكير جدي تبين أن هذه الظاهرة قابلة تماما للتفسير بموجب معارفنا الحالية . ويوجد ظواهر اخرى ، كالادراك

اللاشعوري ، لايمكن تفسيرها بمعلوماتنا العلمية . لكن هذه الظاهرة لم تتأكد بشكل قطعي ولايمكن ان نضمن وجودها . ولو أمكن البرهان عليها لكان ذلك دليلا اكيدا على وجود ثغرات في الفيزياء ، وهذا مايعبر عن الاهمية التي يعلقها الفيزيائيون على التأكد من وجود او عدم وجود ظاهرة ما . وكثير من الناس يدعون ظواهر ليست صحيحة . وهذا أيضا شأن التأثيرات التنجيمية فلو صح ادعاء تأثير النجوم في حسن اختيار يوم الذهاب الى طبيب الاسنان ــ وهذا الضرب من التنجيم شائع في أمريكا ــ لكان ذلك برهانا على عدم صحة نظريات الفيزياء لان هذا العلم ليس فيه اي شيء ينسجم مبدئيا مع هذه الادعاءات . وهذا مايفسر نظرة العلماء بعين الريبة الى هذه الافكار .

لكن التنويم له شأن آخر ، فقبل اجراء دراسة عميقة عليه كان يعتقد باستحالته . اما الآن فقد تبين ان ليس من المستحيل اطلاقا أن يتولد هذا النوع من النوم بتأثيرات فيزيولوجية طبيعية بالرغم من اننا نجهل الكثير عنها ؛ لكن تفسيره لايستلزم بالضرورة صنفا جديدا من القوى .

هذا ، وبالرغم من ان نظرياتنا الحالية حول ما يحدث خارج نواة الذرة تبدو دقيقة نسبيا ووافية ، بمعنى اننا يمكننا مع الزمن حساب كل شيء بأكبر دقة ممكنة ، فان القوى المتبادلة بين النترونات والبروتونات في النواة ما تزال مجهولة وبعيدة عن افهامنا ؛ بمعنى أن معلوماتنا عن هذه القوى ليست كافية ؛ فلو اعطيتموني كل ما اريد من الوقت والحاسبات الالكترونية فلن اتمكن من حساب مستويات الطاقة في نواة الفحم او شيئا من هذا القبيل . فالاجراءات التي نقوم بها لحساب مستويات طاقة الالكترونات خارج النواة لا يمكن تطبيقها في داخل النواة لان القوى النووية ما تزال غير معروفة جيدا .

وللذهاب الى ابعد من ذلك في هذا المجال عكف الفيزيائيون التجريبيون على دراسة ما يحدث في الطاقات العالية جدا . فراحوا يرجمون النترونات ببروتونات ذات طاقة عالية جدا فحصلوا على نتائج غريبة . ومن دراسة هذه النتائج نأمل أن نتفهم القوى المتبادلة بين

النترونات والبروتونات . لقد فتحت هذه التجارب علبة العجائب ! فقد كنا نريد منها فقط أن تعطينا معلومات اكثر عن هذه القوى اذا بها تكشف لنا ، نتيجة التصادم العنيف بين النترون والبروتون ، عن عالم جديد من جسيمات اخرى . فالتجارب التي كانت تستهدف فهم هذه القوى جلبت الينا اكثر من اربع دزينات من الجسيمات الجديدة ؛ وقد وضعناها في حقل النترون والبروتون (شكل ٣٣) لأنها تتفاعل مع النترونات والبروتونات ولها شأن كشأن القوى المتبادلة بينهما .

الكترونات فوتونات غرافيتونات نترينوات	نترونات بروتونات
ميزونات مو (ميونات) نترينوات مو	(أكثر من ٤ دزينات جسيمات أخرى)

+ جميع الجسيمات المضادة

شكل ٣٣

ولتتويج ذلك كله اكتشفنا ، لدى تحريك هذا الوحل كله ، شيئين غريبين عن قضية القوى النووية . أولهما الميزون مو ، أو الميون ، وثانيهما نترينو آخر . فأصبح لدينا نوعان من النترينو ، احدهما يَفِد مع الالكترون والثاني مع الميزون مو . والجديد العجيب المذهل هو أن جميع خواص الميون والنترينو الوافد معه اضحت اليوم معروفة ، أو هكذا يبدو لنا ، من وجهة النظر التجريبية وتبين انهـا تتصرف تماما كما يتصرف الالكترون والنترينو الوافد معه باستثناء أن كتلة الميون تساوي ٢٠٧ مرات من كتلة الالكترون ؛ ذلك هو الفرق الوحيد بينهما ، وهذا أمر غريب . ثم ... سيل غزير !... **أربع دزينات** من الجسيمات الإضافية ــ عدا الجسيمات المضادة . وقد منحت أسماء عديدة : ميزونات ، بيونات ، لمدا ، سغما ... ؛ ان هي الا اسماء ... وازاء

اربع دزينات جسيمات لا بد من عدد كبير من الاسماء ! ولحسن الحظ تبين أن هذه الجسيمات تظهر على شكل طوائف . وبعضها يتجلى بشكل زائف ، بمعنى ان فترة حياتها قصيرة لدرجة انها اليوم موضع مناقشة لمعرفة فيما اذا كان بالامكان حقا الايمان بوجودها ؛ لكنني لن ادخل في هذا الموضوع .

ولتوضيح مفهوم الطائفة سأعتبر حالة النترون والبروتون . فلهما كتلتان متساويتان بفارق من رتبة واحد بالالف . فاحداهما تساوي ١٨٣٦ مرة من كتلة الالكترون والاخرى ١٨٣٩ مرة منها . والادهش من ذلك أن بينهما داخل النواة قوى متبادلة شديدة وأن القوة المتبادلة بين بروتونين لا تختلف اطلاقا عن القوة المتبادلة بين بروتون ونترون . وبتعبير آخر ، لا تسمح القوى النووية بالتمييز بين النترون والبروتون . فلدينا هنا اذن قانون تناظر ؛ يمكن وضع النترون في مكان البروتون دون أن يغير ذلك شيئا ، من وجهة نظر القوى النووية فقط . لكن وضع البروتون في مكان النترون يولد فرقا كبيرا من وجهة نظر الشحنة الكهربائية لان البروتون ، على عكس النترون ، يحمل شحنة كهربائية . فهذا التناظر هو اذن من النوع الذي أسميناه التناظر التقريبي ؛ فهو صحيح من أجل التفاعلات القوية في القوى النووية ولكنه ليس صحيحا في اعماق الطبيعة لانه لا ينطبق على علم الكهرباء . انه تناظر جزئي ولا بد لنا من اعتبار التناظرات الجزئية .

والآن وقد توسعت هذه الطوائف ندرك أن هذا الابدال ، من نوع بروتون بنترون ، يمكن أن يتوسع ليشمل تشكيلة أكبر من الجسيمات . لكن الدقة هنا اضعف . فالتأكيد بأن النترون يمكن دوما أن يحل محل البروتون هو تأكيد تقريبي ــ لا يصح في الكهرباء ــ لكن الابدالات الاوسع التي امكن اكتشافها تعطي تناظرا اضعف من هذا . ومع ذلك فقد ساعدت هذه التناظرات الجزئية على تجميع الجسيمات في طوائف وبالتالي على اظهار الاماكن التي ينقصنا فيها جسيمات وعلى اكتشاف جسيمات جديدة .

وهذا الاسلوب ، الذي يتلخص بتخمين العلاقات بين الطوائف ، يعطي صورة للاجتهاد الاولي في شئون الطبيعة قبل حصول الاكتشاف الحقيقي لقانون أساسي جوهري . والامثلة على هذا الاسلوب عديدة في تاريخ العلم . فاكتشاف مندلييف(١) للجدول الدوري للعناصر تم بأسلوب مشابه ؛ فكان ذلك مرحلة اولية ؛ اما التفسير الكامل لهذا الجدول فقد جاء ، بعد ذلك بكثير ، مع النظرية الذرية . وكذلك تم تنظيم المعلومات عن مستويات الطاقة النووية من قبل ماريا ماير ويانسن(٢) فيما أسمياه النموذج الطبقي للنواة . فالفيزياء هي أسلوب التشابهات الذي يتلخص في تصنيف واختصار مجموعة كبيرة بفضل تخمينات تقريبية .

وبالاضافة الى هذه الجسيمات لدينا جميع المبادىء التي تكلمنا عنها : مبادىء التناظر والنسبية والتصرف الكمومي ؛ وبالنسبية يتصل مبدأ ان جميع قوانين الانحفاظ يجب أن تكون موضعية .

واذا جمعنا هذه المبادىء كلها نكتشف انها اكثر من اللازم وانها متناقضة . فاذا جمعنا ميكانيك الكم مع النسبية مع فكرة ان كل شيء موضعي ، بالاضافة الى مجموعة اخرى من الفرضيات المستورة . نقع في تناقض لاننا نحصل على اللامتناهي لدى حساب كميات شتى . وكيف يمكن أن نقبل ان اللامتناهي ينسجم مع الطبيعة ؟

وكمثال على هذه الفرضيات المستورة التي ذكرتها الآن ، والتي تمنعنا ميولنا المسبقة من فهم معناها الحقيقي ، أسوق القضية التالية :

---

(١) مندلييف ، ديمتري ايفانوفيتش ، ١٨٣٤ - ١٩٠٧ ، كيميائي روسي .

(١) ماريا ماير ، فيزيائية امريكية نالت جائزة نوبل عام ١٩٦٣ واصبحت أستاذة في جامعة كاليفورنيا عام ١٩٦٠ .

هنس دانييل يانسن ؛ فيزيائي ألماني نال جائزة نوبل عام ١٩٦٣ واصبح مديرا لمؤسسة الفيزياء النظرية في هايدلبرغ عام ١٩٤٩ .

اذا حسبنا الاحتمال من أجل كل امكانية ــ لنقل ٥٠٪ من أجل شيء معين ، ٢٥٪ من أجل شيء معين آخر ، وهكذا حتى يكتمل العدد ١٠٠٪ ــ يجب أن يكون مجموع احتمالات كل الامكانيات مساويا ١ ، ونعتقد أن مجموع الامكانيات لا بد أن يعطي ١٠٠٪ ، وهذا يبدو معقولا . لكننا لا نصادف المشاكل الا في الافكار المعقولة !

وفكرة مشابهة أخرى هي ان الطاقة شيء يجب أن يكون موجبا دوما ــ لا يمكن أن تكون الطاقة سالبة . وفكرة أخرى أضيفت ، على الارجح ، قبل ان نقع في تناقض وتسمى السببية وتقول ان النتائج لا يمكن أن تسبق أسبابها .

والواقع أن أحدا لم يتمكن من بناء نموذج خال من أفكار الاحتمالات والسببية ويكون ، في الوقت نفسه ، منسجما مع ميكانيك الكم والنسبية والموضعية و ... الخ . وهكذا لا نعلم تماما أي الفرضيات المستعملة هي التي تقودنا الى مشكلة اللامتناهيات . مشكلة جميلة ! ومع ذلك يتبين أن من الممكن تكنيس اللامتناهيات الى تحت السجادة ، بحيلة كبيرة ، والاستمرار مؤقتا في حساباتنا .

تلك هي اذن الاوضاع الحالية . وأناقش الآن وسائل البحث عن قانون جديد .

يلجأ عموما الى الوسيلة التالية . نبدأ بالتخمين ثم نحسب نتائج تخميننا لنرى ماذا يستدعي هذا القانون لو كان حدسنا صحيحا . ثم نقارن نتائج حساباتنا مع الطبيعة بفضل التجربة . فاذا وجدنا اختلافا كان تخميننا خاطئا . وهذا النص البسيط هو مفتاح العلم . ان جمال الفكرة موضوع الحدس لا يغير شيئا ــ كما أن ذكاء أو شخصية المخمن لا يغيران شيئا ــ فاذا لم تتفق مع التجربة فهي خاطئة رغم جمالها ؛ وهذا هو الاساس . صحيح انه يجب اجراء عدة تحقيقات قبل أن نصدر الحكم ، لان المجرب قد يكون ارتكب خطأ في حساب شيء ما أو فاته أحد جوانب التجربة كأن يكون الجهاز قذرا أو شيئا آخر من هذا القبيل .

وقد يرتكب الشخص الذي يخمن ، ولو اجرى التجربة بنفسه ، خطأ في تحليل النتائج . كل هذا قد يحدث ، وعندما اقول : « اذا لم يحصل اتفاق مع التجربة فالحدس خاطىء » أعني بعد التحقق من التجربة ومن الحسابات وبعد تقليب النظر جيدا في كل شيء حتى نتأكد من أن نتائج التخمين هي بالفعل والمنطق نتائج التخمين وان النتيجة لا تتفق مع التجربة الجارية بعناية وانتباه .

قد تأخذون مما قلت انطباعا سيئا عن العلم فيخيل اليكم أننا نقضي العمر في تخمين الامكانيات ومقارنتها بالتجربة ، مما يضعف دور التجربة كثيرا . والواقع أن المجربين أناس فردانيون . فهم يحبون اجراءالتجارب حتى ولو لم يخمن أحد نتائجها ، وغالبا مايتحرون مجالات يعرفون سلفا أن النظريين لم يقوموا فيها بأي تخمين . فنحن ، مثلا ، نعرف كثيرا من القوانين لكننا لانعلم اذا كانت صحيحة حقا في مجال الطاقات العالية ، وصحتها فيها ليست سوى افتراض . فحاول المجربون اجراء تجاربفي الطاقات العالية ، وكانت النتيجة أن بعض هذه التجارب خلقت مشاكل أي انها كشفت لنا عن خطأ شيء كنا نعتبره صحيحا . فالتجربة قد تعطي نتائج غير متوقعة فتدعونا من جديد الى التخمين . وكمثال على النتائج اللامتوقعة ذكرنا الميزون مو والنترينو الوافد معه اللذين لميخمن أحد على الاطلاق وجودهما قبل اكتشافهما ، حتى أن احدا لم يصدر عنه حتى اليوم اي تخمين يجعل هذه النتيجة طبيعية .

لاشك انكم تشعرون بأن هذه الطريقة يمكن بواسطتها ان نفند اية نظرية معينة . فاذا كنا ازاء نظرية آتية عن التخمين ويمكن انطلاقا منها أن نحسب نتائجها ثم نقارن هذه النتائج بنتائج التجربة امكننا ان نفندها اذا لم تتطابق النتائج . وبذلك يمكن مبدئيا أن نتخلص من كل نظرية خاطئة . فبالامكان اذن البرهان على خطأ نظرية معينة ؛ ولكن تلاحظون انه من غير الممكن البرهان على صحتها .

افترضوا انكم اخترعتم نظرية فحسبتم نتائجها ثم اكتشفتم في كل

مرة ان هذه النتائج تتفق مع التجربة . فهل هذه النظرية صحيحة ؟ كلا، وكل ماهنالك أنكم لم تستطيعوا اثبات خطئها . فقد تحسبون منها ، فيما بعد ، تشكيلة من النتائج اكثر عددا وقد يكون لديكم امكانية اجراء تشكيلة أخرى من التجارب ، وعندها قد يحدث أن تكتشفوا أن هذه النظرية خاطئة . ومن هنا تفهمون لماذا تستمر صحة بعض القوانين كقوانين نيوتن في الحركة . لقد خمن نيوتن قانون التثاقل وحسب كل ماينتج عنه ثم قارن ذلك بالتجربة – وقد مرت مئات السنين قبل أن يكتشف تجريبيا الفرق الضئيل في حركة عطارد . فخلال هذه المدة كلها لم يمكن اثبات خطأ هذه النظرية واعتبرت صالحة بصورة مؤقتة . ولكن لم يمكن البرهان أبدا على انها صحيحة لان التجربة القادمة قد تنجح في اثبات خطأ نظرية كانت تعتقد صحيحة . فلا مجال اذن أبدا للتأكد المطلق من صحة آرائنا ، وكل مايمكن تأكيده هو امكانية الخطأ . والمدهش ، مع مع ذلك ، هو اننا ما نزال نملك نظريات تدوم كل هذا الوقت .

ويوجد وسيلة لايقاف تقدم العلم وتعود الى عدم اجراء تجارب الا في المجالات التي نعرف قوانينها . لكن التجريبيين مولعون بالبحث الدائب والمجهد في تلك المجالات بالذات التي يحتمل إمكانية البرهان على خطأ النظريات فيها . وبتعبير آخر ، نحن نحاول ، باستمرار وباسرع مايمكن اثبات اننا مخطئون لان تلك هي الوسيلة الوحيدة للتقدم . فمثلا ، لدينا اليوم ظواهر كثيرة في الطاقات المنخفضة ولكننا لا نجد بينها شيئا غير عادي ، ولذا نعتقد أن كل شيء فيها يسير على مايرام فلا نضع اي برنامج خاص للبحث عن مشاكل في التفاعلات النووية ، ولا في الناقلة العليا . وأنا استهدف ، في هذه المحاضرات ، اكتشاف القوانين الاساسية . والفيزياء بمجموعها ، أو المهم منها ، تسعى الى تفهم الظواهر ، كالناقلية العليا والتفاعلات النووية ، بدلالة القوانين الاساسية الكبرى . لكنني أهتم الآن باكتشاف ما هو غير صحيح في القوانين الاساسية ولما كنا لا نعرف ما يستحق البحث في مجال الطاقات المنخفضة تلجأ التجارب الحالية الى التفتيش في مجال الطاقات العالية .

ونقطة اخرى لا بد من ذكرها وهي : لا يمكن اثبات خطأ نظرية غير دقيقة . اذا كان نص الفرضية رديئا وغامضا بعض الشيء وكانت الطريقة المستعملة لحساب نتائجها فيها شيء من عدم الدقة ، أي اذا كنتم غير متأكدين وتقولون : « اعتقد أن كل شيء صحيح لانه ينتج عن كذا ولان هـذه الفكرة أو تلك تؤدي الى هـذه النتيجة أو تلك ولانني أستطيع بالتقريب أن أشرح كيف يتم ذلك ... » عندئذ سترون أن هذه النظرية صحيحة لعدم امكانية اثبات خطئها ! وتصلون الى موقف مماثل اذا كانت النتائج غير معينة أي اذا استطعتم ، بقليل من المهارة ، أن تجدوا تشابها بين أية نتيجة تجريبية والنتائج المنتظرة . ولا ريب انكم متعودون على أوضاع مشابهة في مجالات أخرى مثل : فلان يكره أمه ؛ ذلك ، بالتأكيد لانها لم تحبه ولم تدلله كفاية عندما كان صغيرا . لكن ، بعد التحقيق ، نكتشف انها تحبه في الواقع كثيرا ولا يوجد اية مشكلة ، وما كرهه لها الا نتيجة لتدليلها اياه اكثر من اللازم عندما كان صغيرا! فبواسطة نظرية غامضة يمكن الوصول الى نتيجة او الى سواها . والوسيلة للخروج من هذا الوضع هي التالية . اذا أمكن ، سلفا وبالضبط ، تعيين متى يكون الحب أقل من اللازم ومتى يكون اكثر من اللازم ، عندئذ يكون لدينا نظرية مبررة تماما ويمكن أن نقوم علـى أساسها بالتحريات . لكن بعض الناس يجيبون على هذه الملاحظة بما يلي : « لايمكن في علم النفس تحديد تعاريف بهذه الدقة » حسنا ، لكنكم عندئذ لايمكن ان تزعموا انكم عرفتم شيئا في علم النفس .

ستعلمون الان ، ويالهول ماستعلمون ! انه يوجد في الفيزياء مثالان من هذا النوع تماما . فلدينا تلك التناظرات التقريبية تحسبون بواسطتها مجموعة نتائج مفترضين ان التناظر تام . وعندما تقارنونها بالتجربة تجدون اختلافا . فاذا كان هذا الاختلاف ضئيلا تقولون : « لا بأس ! » لكن اذا كان كبيرا تقولون : « ليكن ، لكن هذا يدل على أن هذه الظاهرة حساسة ، بصورة خاصة ، ازاء عدم تمام هـذا التناظر » . لكم أن تسخروا ، لكننا بهذه الطريقة نتقدم . فعندما نكون ازاء ظاهرة جديدة

تماما ، وهذه الجسيمات جديدة علينا ، نلجأ الى هذه الاساليب الماكرة ، الى حاسة الشم العلمي للنتائج ، تلك الحاسة التي ينطلق منها كل علم .

ففكرة التناظر في الفيزياء تشبه ما يجري في علم النفس . لا تضحكوا عاليا ! فنحن في هذه الطريقة حذرون جدا ، لان الانزلاق السيىء سهل الحصول في النظريات الغامضة ، وهي من الصعب اثبات خطئها ولا بد من كثير من المهارة والخبرة في هذا النوع من اللعب كي لا نخسر الجولة .

وفي هذه الطريقة المستندة على التخمين وحساب النتائج ومقارنتها بالتجربة قد نصادف عقبات كأداء في مراحل عديدة ؛ منها ما نصادفه في مرحلة الفرضية ، نتيجة نقص في الافكار ، أو في مرحلة الحسابات . فمثلا ، اقترح يوكاوا(١) فكرة تخص القوى النووية عام ١٩٣٤ ، لكن احدا لم يتمكن من حساب نتائجها بسبب الصعوبات الرياضية الجمة ولم يمكن مقارنة فكرته بالتجربة . وبقيت نظريات يوكاوا قائمة حتى حصل اكتشاف كل تلك الجسيمات الاضافية التي لم يرها يوكاوا ، وعندها اتضح لنا أن تلك النظرية لم تكن من البساطة التي توهمها . وكمثال على عقبة نصادفها في المرحلة التجريبية نسوق نظرية التثاقل الكمومية . فهي تتقدم ببطء شديد ، اذا لم نقل أنها لم تتقدم بالمرة ، لانه لم يمكن حتى الآن تحقيق تجربة يتدخل فيها ميكانيك الكم والتثاقل جنبا الى جنب . فقوة التثاقل ضعيفة جدا اذا قورنت بالقوة الكهربائية.

وأنا كفيزيائي نظري ذي ميول الى المرحلة الاولى في البحث أريد أن اشرح لكم الآن كيف نصنع الفرضيات . فأصل الفرضية ، كما قلت سابقا ، ليس مهما ولكن المهم هو أن تتفق مع التجربة وأن يكون هذا الاتفاق أدق ما يمكن . وقد تقولون لي : « هذا أمر سهل جدا . وما علينا سوى أن نصنع آلة حاسبة ضخمة ذات دواليب ومسننات كآلات اليانصيب تعمل سلسلة من الفرضيات وكلما أخرجت فرضية بخصوص

(١) هيديكي يوكاوا فيزيائي ياباني . مدير مؤسسة البحوث في الفيزياء الاساسية في كيوتو . حاز جائزة نوبل عام ١٩٤٩ .

سير الطبيعة تقوم رأسا بحساب نتائجها ثم تقارن هذه النتائج بقائمة من النتائج ندخلها سلفا في الطرف الآخر من الآلة . » أي انكم تقولون بأن التخمين هو عمل الاغبياء . لكن الواقع على عكس ذلك ، وسأشرح لكم السبب .

القضيــة الاولى : من أين نبدأ ؟ ستجيبون : « ننطلق من جميع المبادىء المعروفة . » لكن المبادىء بمجموعها تناقض بعضها بعضا ، ولا بد من استخلاص شيء . يرد علينا أكوام من الرسائل من اناس يصرون على وضع ثقوب في فرضياتنا . ونصنع هــذه الثقوب كي نترك مكانا لفرضية جديدة . فيقال لنا : « يا قوم ، تقولون دوما ان المكان مستمر . فكيف عرفتم ، عندما تصلون الى أبعاد مكانية صغيرة جدا ، اذا كان يوجد حقا العدد الكافي من النقاط المرحلية ، وأن هذا ليس فقط كمية من النقاط المنفصلة بمسافات صغيرة ؟ » أو يقال : « تلك السعات التي تكلتم لنا عنها في ميكانيك الكم ، انها معقدة ولا معقولة ، ما الذي يدعوكم الى الاعتقاد بأنها صحيحة ؟ » ان هذه ملاحظات بديهية وواضحة تماما لكل من يعملون في هذه القضية . ولا فائدة من لفت النظر اليها . والمسألة ليست فقط الشيء الذي يمكن أن يكون خطأ . بل ، بالضبط ، ما يمكن أن نضع في مكانه . ففي حالة المكان المستمر لنقترح فكرة دقيقة يكون بموجبها المكان مؤلفا حقا من سلسلة نقاط وأن الفراغ بين هذه النقاط لا يعني شيئا وان هذه النقاط تشكل شبكة مكعبات . نستطيع عندئذ أن نبرهن رأسا أن هذا خطأ ، انه لا يفي بالغرض . فالمسألة ليست ببساطة أن نقول عن شيء انه خطأ بل أن نضع مكانه شيئا آخر – وهذا ليس سهلا . وبمجرد أن توضع فكرة دقيقــة حقا نشعر رأسا انهــا لا تفي بالغرض .

والصعوبة الثانية هي وجود عددد لامتناه من الامكانيات التي من هذا النوع . وهذا يشبه وضعنا اذا حاولنا ان نفتح صندوق خزنة ذا ارقام سرية ؛ فنحاول طويلا لنكتشف ترتيب الارقام ، وفجأة يتقدم انسان لا يدري شيئا عن الترتيبات التي جربناها ويقول : « لماذا لا تجربون

الترتيب ١٠ – ٢٠ – ٣٠ ؟ » فنحن قد جربنا عدة ترتيبات وربما كان من جملتها ١٠ – ٢٠ – ٣٠ . وربما كنا نعلم أن العدد في الوسط هو ٣٢ وليس ٢٠ . وقد نعلم سلفا أن الترتيب يتألف من خمسة أرقام ... فأرجوكم اذن ان لا تكتبوا لي محاولين ان تقترحوا ترتيبا قد يفي بالغرض. سأقرأ رسائلكم – سأقرأها على كل حال لأتأكد فيما اذا كنت قد فكرت ام لا ، بمقترحاتكم – لكن الاجابات ستسفرق مني وقتا أطول من اللازم لانني أعلم ان مقترحاتكم لن تختلف عموما عن الاقتراح « جرب ١٠ – ٢٠ – ٣٠ » . والطبيعة ، كما هي الحال دائما ، ذات خيال أوسع من خيالنا بكثير والدليل هو كل ما ذكرناه عن النظريات البارعة والعميقة . وليس من السهل ايجاد فرضيات على هذه الدرجة من البراعة والعمق . والتخمين الجيد لا بد له من ذكاء حاد وهـذا غـير متوفر في أحسن الآلات الحاسبة .

والآن اريد أن اتكلم عن فن تخمين قوانين الطبيعة ، لأنه فن حقا . كيف نعمل ؟ قد تقترحون أن نراجع كتب التاريخ كي نرى كيف فعل اسلافنا . لنستشر التاريخ اذن .

يجب البدء بنيوتن . لم يكن تحت تصرفه سوى معلومات ناقصة ونجح مع ذلك في اكتشاف القوانين بأن وضع معا مجموعة أفكار قريبة كلها من التجربة . ولم يكن يوجد هوة كبيرة بين نتائج النظرية والتجربة. كانت تلك أول طريقة ولكنها ليست ملائمة اليوم . وبراعة أخرى ظهرت من مكسويل الذي وجد قوانين الكهرباء والمغنطيسية . واليكم ما فعله : لقد وضع معا جميع قوانين الكهرباء التي اكتشفها فارادى وسواه من قبل . ولدى دراستها تبين له أنها متناقضة رياضيا . ولازالة هـذا التناقض اضاف حدا آخر للمعادلة . وقد فعل ذلك بأن اخترع لنفسه نموذجا من الدواليب المسننة واللولبية ... الخ في الفراغ . فوجـد القانون الجديد – لكن أحدا لم يعره اهتماما لعدم الاعتقاد بالمسننات . ورغم ان عدم الاعتقاد بها ما زال قائما اليوم الا أن المعادلات التي حصل عليها كانت صحيحة . فقد يكون المنطق اذن خطأ ويكون الجواب مع ذلك صحيحا .

اما بخصوص النسبية فامر اكتشافها مختلف تماما . فقد تراكمت الغرائب : اصبحت القوانين المعروفة تعطي نتائج متناقضة . وكانت قد دخلت ، في المحاكمة ، طريقة جديدة تستند على اعتبارات التناظر . واصبح الوضع صعبا جدا . فلأول مرة أدرك الناس أن شيئا مهما كقوانين نيوتن يمكن أن تبدو صحيحة فترة طويلة وهي في نهاية الامر خاطئة . وميكانيك الكم تم اكتشافه بطريقتين مستقلتين ــ وهذا درس بحد ذاته . وهنا ايضا ، وبشكل أخطر ، كشفت التجربة عن مجموعة من الغرائب ، عن أشياء لا يمكن اطلاقا أن تتفسر بالقوانين التي كانت معروفة . ولم يكن الذنب ناتجا عن قلة القوانين بل عن كثرتها . هل يمكنكم أن تتوقعوا ذلك ــ كلا . لقد وجد سبيلان ، سلك أحدهما شرودنغر[1] الذي حزر المعادلة وسلك الآخر هايزنبرغ الذي أصر على ان لا تعالج سوى القضايا القابلة للقياس تجريبيا . وهاتان الطريقتان المختلفتان فلسفيا أوصلتا الى نفس الاكتشاف .

ومنذ فترة أقصر جاء اكتشاف قوانين التفكك الضعيف الذي تكلمت عنه عندما يتفكك النترون الى بروتون والكترون ونترينو مضاد ــ وهي قوانين معروفة جزئيا فقط ــ فأدى الى وضع يختلف قليلا . وكان ذلك ، في هذه المرة ، نقصا في معلوماتنا وليس اكتشاف معادلة . ولكن كان هناك صعوبة خاصة وهي أن جميع التجارب كانت خاطئة . فكيف يوجد جواب صحيح اذا كان حساب النتائج لا يتفق مع التجربة ؟ والقول بأن التجارب هي الخاطئة يحتاج الى شجاعة . وسأشرح لكم فيما بعد دواعي هذه الشجاعة .

واليوم ليس عندنا غرائب (مبدئيا) . صحيح أن لدينا تلك اللامتناهيات التي تتدخل عندما نضع جميع القوانين معا ، لكن الناس الذين يكنسون الأقذار ، ليضعوها تحت السجادة ، هم ماهرون لدرجة

---

[1] ارفين شرودنغر ، ١٨٨٧ ــ ١٩٦١ ، فيزيائي نظري نمساوي . حاز على جائزة نوبل عام ١٩٣٣ مع بول ديراك .

انهم يقنعونكم بعدم وجود غرائب خطيرة . هذا وان وجود هذه الجسيمات لم يزد في معلوماتنا شيئا سوى أن معلوماتنا ناقصة .

انني متأكد ، كما يتضح من الامثلة التي ذكرناها ، من أن التاريخ لايعيد نفسه في الفيزياء ، واليكم السبب . ان الطرائق التي مثل « فكروا في قوانين التناظر » أو « ضعوا المعلومات على شكل رياضي » أو « احزروا المعادلات » معروفة اليوم لدى الجميع ونحن نجربها كلها في كل مرة . فعندما تتعسر عليكم الامور فالجواب لايمكن أن يكون واحدا من هؤلاء لانكم جربتموها قبل كل شيء . وكلما وجدتم انفسكم في ضائقة ازاء كثير من المزعجات والمشاكل فذلك لانكم استعملتم نفس الطرائق السابقة . فالاكتشافات الجديدة لا تأتي الا من أفكار جديدة . فليس التاريخ اذن ذا فائدة تذكر .

والآن أريد أن أوجز لكم فكرة هايزنبرغ التي توصي بأن لاننطلق مما لايمكن قياسه . فكثير من الناس يتكلمون عن هذه الفكرة دون أن يفهموها حقا . ويمكن اعطاء التفسير التالي: ان الاقتراحات والابتكارات التي تقدمونها يجب أن تكون نتائجها الحسابية قابلة للمقارنة بالتجربة — أي لايجب أن تكون النتائج من الشكل : « ان الخنفشار الواحد يجب أن يساوي ثلاث طنمسات » في حين أن أحدا لايعرف ماهو الخنفشار ولا ماهي الطنمسة. فأشياء من هذا القبيل لاتجدي بالطبع فتيلا . أما اذا كان ممكنا مقارنة النتائج بالتجربة فان هذا هو غاية المرام . هذا وان ورود الخنفشار والطنمسة في الفرضيات أو عدم ورودهما سيان . ولا مانع من وضع مانريد من الزوائد شريطة أن يمكن مقارنة النتائج بالتجربة . وهذا ليس دوما مفهوما بشكل جيد . فالناس كثيرا مايتذمرون من التعميم اللا مبرر لمفاهيم الجسيمات والمسارات و ... الخ في مضمار الذرات لكن كلا ، ليس هذا التعميم غير مبرر . بل لابد لنا من أن نندفع دوما الى أبعد ، الى أبعد من المجال المعروف ، الى أبعد من هذه المفاهيم القديمة . ان هذا بالطبع خطر وغير مأمون ، ولكنه الوسيلة الوحيدة للتقدم . والعلم ، بالرغم من كونه غير اكيد ، يجب أن يكون مفيدا . وفائدته لاتحصل الا اذا

تحدث عن تجارب لم تتركب بعد ، ولاجدوى من أن يخبرنا فقط عما قد حدث ،بل يجب تطبيق الافكار على مجالات لم يتم تحريها تجريبيا . فقانون التثاقل الذي خلق كي يفسر حركة الكواكب لم يكن ليفيد شيئا لو أن نيوتن قال في نفسه : « الآن فهمت الكواكب » دون أن يشعر بقدرته على اجراء المقارنة مع جذب الارض للقمر ــ وللاجيال التالية أن تقول : «ربما كان التثاقل هو السبب في تماسك المجرات وماعلينا سوى أن نحاول » . وقد تقولون لي : « عندما نصل الى أبعاد المجرات ، ونحن لانعلم عنها شيئا ، فان كل شيء ممكن » ؛ هذا صحيح ، لكن ليس العلم أن نقبل هذا النوع من التحديد ؛ ولايوجد فهم نهائي للمجرات . ولو افترضتم ، من جهة أخرى ، أن سلوكها يتفسر فقط بالقوانين المعروفة فان هذه الفرضية تكون محدودة ومطلقة وسهلة النقض بالتجربة والذي نبحث عنه فرضيات بسيطة ، كبيرة الدقة وسهلة المقارنة بالتجربة . الواقع أن سلوك المجرات حتى اليوم لا يبدو مناقضا لهذه الفرضية .

ويمكن أن أسرد لكم مثالا آخر أكثر اثارة واهمية . لاشك أن الفرضية الاكثر قدرة والاكثر مساهمة في تطور البيولوجيا هي أن كل ماتفعله الحيوانات يمكن ان تفعله الذرات ، أن الاشياء التي نراها في عالم البيولوجيا هي نتائج سلوك الحوادث الفيزيائية والكيميائية دون « شيء صغير اضافي » . وقد تقولون عندئذ : « كل شيء ممكن في الكائنات الحية » ، اذا قبلتم أن لا تفهموا أبدا الكائنات الحية . فمن الصعب القبول أن تموجات سواعد الاخطبوط ليست سوى ذرات تتلاعب وفق قوانين الفيزياء المعروفة . ولكن عندما نقوم بابحاث مع هذه الفرضية نتوصل الى تخمين ما يحدث بدقة كبيرة . وبهذه الصورة نحقق تقدما كبيرا في الفهم : ان الساعد لم تقطع حتى الآن ــ لا يمكن القول أن هذه الفكرة خاطئة . ان العلم لا يتعارض مع اصدار الفرضيات رغم ان كثيرا من العوام يظنون العكس . فمنذ بضعة سنوات حصلت بيني وبين احد العوام مناقشة حول الصحون الطائرة ! قلت له : « أنا لا أعتقد بالصحون الطائرة » . فأجاب : « هل هذا مستحيل ؟ هل يمكنك اثبات استحالتها ؟ » فقلت : « كلا . لا أستطيع اثباته ، لكنها غير محتملة

بالمرة . » وعندها قال : « انك لست علميا في شيء ! كيف يمكنك ان تقول انها غير محتملة اذا كان لا يمكنك اثبات انها مستحيلة ؟ » لكن هذا هو بالذات الموقف العلمي . ان العلم يعود ، فقط ، الى القول بما هو ارجح أو أقل احتمالا وليس الى اثبات ما هو ممكن وما هو مستحيل . ولكي احدد ما اعنيه بالضبط كان علي أن أقول له : « اسمع ، أريد ان أقول ، بموجب المعلومات التي لدي عن العالم ، ان قصص الصحون الطائرة ناتجة على الارجح من لا عقلانيات الفكر البشري الارضي المعروفة لا من الجهود العقلانية المجهولة لذكاء خارجي عن الارض . » ان ما أقوله هو الارجح ، وهو فرضية جيدة . فنحن نحاول دوما ايجاد التفسير الارجح . ولا ننسى ، عندما لا نتوفق في تفسير ما ، وجوب البحث عن امكانيات أخرى ومناقشتها .

وكيف نحزر ما يجب الاحتفاظ به وما يجب طرحه بعيدا ؟ ان عندنا كل تلك المبادىء الجميلة وهذه الامور المعروفة ، ولكن عندنا هذه الصعوبات : اما أن نحصل على لا متناهيات او ان تفسيرنا ليس كافيا - تنقصنا بعض الجوانب . وازاء ذلك نضطر أحيانا الى نبذ بعض الافكار ، وقد حدث في الماضي أن بعض الافكار الراسخة قد نبذت . فالمسألة تعود الى معرفة ما يجب نبذه وما يجب الاحتفاظ به . فلو نبذنا كل شيء لكان ذلك مبالغة منا ولما بقي لدينا ما نستهدي به . فمبدأ انحفاظ الطاقة له ، على كل حال ، منظر جميل ولا أريد أن أنبذه . وان تخمين ما يجب امساكه وما يجب نبذه يتطلب مهارة فائقة . الواقع أن ذلك هو بلاشك مسألة حظ ولكن يبدو أنه يتطلب كثيرا من المهارة .

ان سعات الاحتمال غريبة جدا ، وأول ما يفكر المرء به هو أن الافكار الغريبة هي أفكار لا يؤبه لها . ومع ذلك فان كل ما يمكن استنتاجه من نظريات وجود سعات الاحتمال في ميكانيك الكم هو أنها ، رغم غرابتها ، ملائمة مائة في المائة من اجل القائمة الطويلة للجسيمات الغريبة. فانا ، اذن ، لا أعتقد أننا ، عندما نكتشف تركيب احشاء العالم ، سنفهم أن هذه الافكار خاطئة . فهذا الجزء ، على ما اعتقد ، صحيح ؛ لكني

لم افعل سوى التخمين : وبذلك أشرح لكم كيف نخمن .

ومن جهة اخرى اعتقد أن نظرية المكان المستمر خاطئة لاننا نحصل على تلك اللامتناهيات وعلى صعوبات اخرى ، ويبقى لدينا مسائل تخص تعيين حجم جميع الجسيمات . وعنـدي بالاحرى انطباع أن الافكار البسيطة في الهندسة تصبح خاطئة عندما نعممها على الامكنة الصغيرة جدا . وهنا اكتفي طبعا بترك ثقب دون أن اقول لكم ما يجب أن نضع فيه . ولو قلته لكم لأنهيت احاديثي بقانون جديد .

ويستغل بعض الناس تناقض المبادىء ليقولوا بوجود عالم منطقي واحد ويعتقدون أننا لو جمعنا هذه المبادىء معا وقمنا بحسابات دقيقة فسنتوصل ، ليس فقط الى استنتاج المبادىء ، ولكن ايضا الى اكتشاف ان هذه المبادىء هي الوحيدة الممكنة اذا وجب على هذا العالم ان يبقى منطقيا . وهذه الفكرة تبدو لي مبالغا فيها ؛ فهي كمن يطلق النار على رباط حذائه كيف يرتفع في الهواء . فانا اعتقد بوجوب الانطلاق من مبدأ ان بعض الاشياء موجودة – ليس كل الجسيمات الخمسين ولكن بضعة اشياء صغيرة ، كالالكترونات ... الخ – ومن ثم أن كل المبادىء يجب ان تؤدي الى تعيين هـذا العدد الكبير من الوقائع . اي انني لا اعتقد بامكانية الحصول على المجموعة كلها من مجرد الاعتبارات المنطقية .

وتبرز مشكلة اخرى وتتلخص في مغزى التناظرات الجزئية كالتناظر الموجود بين النترون والبروتون ، الذي لا يصح في الكهرباء ، والتناظر المرآتي الانعكاسي التام الا في نوع واحد من التفاعل . انها مشكلة مزعجة والناس ازاءها فريقان . فريق يقول بانها بسيطة وأن هذه القوانين متناظرة حقا لكن تعقيدا صغيرا يجعلها تنحرف قليلا ؛ وفريق آخر ، ليس له من نصير سواي ، يؤكد العكس ويقول ان المشكلة قـد تكون عويصة ولن تتجلى بساطتها الا من خلال تعقيداتها . فالاغريق كانوا يعتقدون أن مسارات الكواكب دائرية . ثم اتضح انها اهليلجية . فهي ليست متناظرة تماما لكنها لا تختلف كثيرا عن الدوائر . فلماذا هي شبه

متناظرة ؟ ان ذلك ناجم عن مفعول طويل الامد ومعقد ،ناتج عن احتكاك المد والجزر ــ فكرة عويصة . ربما كانت الطبيعة في أعماقها متناظرة تماما في جميع الاشياء لكن تعقيدات الواقع تجعلها تظهر شبه متناظرة والاهليلجيات هي أشباه دوائر . انها امكانية أخرى ، ولكن لا يدري احد شيئا ، وكل افكارنا فرضيات . لنفترض نظريتين ، **ب و ج** ، مختلفتين ظاهريا من وجهة النظر النفسانية وتحويان أفكارا مختلفة ... الخ ، لكن جميع نتائجهما الحسابية متطابقة ومنسجمة مع التجربة. فالنظريتان المختلفتان في البدء ظاهريا تؤديان الى نتائج متشابهة . وهذا ما يمكن اثباته رياضيا بالبرهان على أن المنطق المنطلق من **ب** أو **ج** يعطي في كل الاحوال نتائج متطابقة . فاذا كنا ازاء نظريتين كهاتين ، كيف نقرر أيتهما الصحيحة ؟ ان هذا غير ممكن علميا لانهما كلتيهما على نفس الدرجة من الانسجام مع التجربة . فقد يحدث اذن أن تكون ازاء نظريتين متكافئتين رياضيا رغم انطلاقهما من أفكار مختلفة جذريا ؛ ولا سبيل عندئذ ، علميا ، للاختيار بينهما .

ومع ذلك ولأسباب نفسانية وفي سبيل ايجاد نظريات جديدة يمكن ان لا تتكافأ هاتان النظريتان بصورة مطلقة بل يمكن ، على العكس ، أن تعطيا أفكارا مختلفة . فاذا وضعنا النظرية في اطار معين نأخذ فكرة عما يجب تغييره . فقد توجد مثلا في النظرية **ب** فكرة تخص نقطة معينة وتقولون : « أريد أن أغير هذه الفكرة » . لكن ايجاد الفكرة التي يجب تغييرها مقابل ذلك في النظرية **ج** قد يكون امرا شائكا جدا ــ فقد لا تكون هذه الفكرة بسيطة أبدا . وبتعبير آخر : بالرغم من تكافؤ النظريتين قبل احداث التغيير فان بعض التغييرات تبدو طبيعية على احداها وليس على الاخرى . فلأسباب نفسانية يجب اذن أن تحفظ ذاكرتنا جميع النظريات . وكل فيزيائي نظري جدير بهذا الاسم يعرف ستة أو سبعة نماذج نظرية مختلفة للفيزياء نفسها ؛ وهو يعلم أنها كلها متكافئة وأن ليس باستطاعة أحد ان يقرر أبدا ، على هذا المستوى ، أيها الافضل ولكنه يحتفظ بها في ذاكرته آملا أن توحي اليه في المستقبل بأفكار جديدة في البحث . وهذا يذكرني بنقطة اخرى : ان الفلسفة او الافكار التي

تصاحب نظريــة ما قد تتغير كثيرا عندما يطرأ على النظريــة تغييرات طفيفة . فأفكار نيوتن عن المكان والزمان مثلا تنسجم بشكل جيد جدا مع التجربة ، لكن الحصول على الحركة الفعلية لمسار كوكب عطارد ، اي على فرق ضئيل ، اقتضى ادخال تعديلات جذرية على النظرية . والسبب هو ان قوانين نيوتن كانت على درجة كبيرة من البساطة والكمال واعطت نتائج دقيقة . وقد وجب ، للحصول على سبب الفروق الطفيفة، ان نغيِّر النظرية تغييرا عميقا . فعندما نلفظ قانونا جديدا لا يجب خلق شذوذات في شيء كامل بل يجب خلق شيء كامل آخر . وعلى هذا يوجد فرق عظيم في الآراء الفلسفية بــين نظريات نيوتن ونظريات آينشتاين في التثاقل .

ما هما هاتان الفلسفتان ؟ انهما طريقتان فذّتان حقا في الحساب السريع للنتائج . فالفلسفة ، أو ما نسميه أحيانا ادراك القانون ، ليس سوى وسيلة يتمكن المرء بواسطتها من استذكار القوانين في رأسه كي يجد نتائجها بسرعة . وقد قال بعضهم ، وهذا صحيح في حالة كحالة معادلات مكسويل : « دعوا الفلسفة والافكار التي من هذا القبيل جانبا واوجدوا المعادلات فحسب . فالمسألة الوحيــدة عندئذ هي حساب النتائج كي تنسجم مع التجربة ولا حاجــة للفلسفة ولا للمناقشة ولا للتعليق على المعادلات . » وهذا صحيح بمعنى أنكم لو أوجدتم المعادلات فحسب لن تؤثر فيكم الافكــار المسبقة وسيكون تخمينكم اقرب الى الصحــة .

ومن جهة اخرى قد تساعد الفلسفة على ايجاد النظريات . وهذا أمر صعب . والى أولئك الذين يصرّون على ان المهم هو ان تنسجم النظرية مع التجربة اريد أن اتخيل مناقشة بين عالم فلكي ، من قبائل المايا ، وتلميذه . ان علماء هذه القبائل كانوا يعرفون الحساب الدقيق للتنبؤات عن الكسوف والخسوف وعن مواضع القمر في السماء ومواضع كوكب الزهرة و ... الخ ، ويستخدمون لذلك علم الحساب العددي البسيط : يعدون ويجمعون ويطرحون ... الخ . فلا يتحدثون عن ماهية القمر

ولا عن الآراء في دورانه . بل يحسبون فقط الوقت الذي سيحدث فيه الخسوف والوقت الذي يصبح فيه القمر بدرا وهكذا . تخيلوا أن شابا جاء الفلكي وقال له : « عندي فكرة . ربما كانت هذه الاجرام تدور وأن السماء العالية تحوي كرات مصنوعة من شيء يشبه الصخر ، وقد نستطيع حساب حركاتها بطريقة تختلف تماما عن الطريقة التي تستهدف فقط حساب الاوقات التي تظهر فيها في السماء . » فيجيب الفلكي : « آه ! حسنا . وبأية دقة يمكنك أن تتنبأ عن الخسوفات . » ويقول الشاب : « لم اذهب بعد في دراستي الى هـذا الحد . » وهنا يقول الفلكي : « لكننا يمكننا حساب الخسوفات بدقة أحسن مما تفعل بنموذجك هذا ؛ دع عنك هذه الفكرة لان الطريقة الرياضية أحسن طبعا . » فعندما يأتي انسان بفكرة ويقول : « لنفترض أن العالم هكذا » . والناس ميالون الى أن يجيبوه : « ما هي الاجوبة التي تعطيها لهذه المسألة وتلك ؟ » فيقول : « لم أتقدم بعد في دراستي الى هذا المدى . » وعندها يقولون له : « لقد قطعنا نحن ، بما لدينا ، مدى طويلا وحصلنا على أجوبة دقيقة جدا . » فالمسألة تعود اذن الى معرفة فيما اذا كان علينا ، أم لا ، الاهتمام بالفلسفات الموجودة وراء الافكار . وطريقة عمل أخرى تتلخص طبعا في ايجاد مبادىء جديدة . ففي نظريته في التثاقل اكتشف آينشتاين ، بالاضافة الى كل المبادىء الاخرى ، المبدأ الذي يخص فكرة تناسب القوى دوما مع الكتل . ووجد المبدأ الذي من أجله لا تستطيعون ، اذا كنتم في سيارة تتسارع ، أن تميزوا وضعكم عن الوضع الذي تشعرون به عندما توجدون في حقل تثاقل . وباضافة هذا المبدأ الى المبادىء الاخرى نجح آينشتاين في استنتاج القوانين الصحيحة للتثاقل .

ان ذلك يعطيكم لمحة عن عدد من الطرق الممكنة المتبعة في البحوث . والآن أريد أن أنتقل الى بعض جوانب أخرى تخص النتيجة النهائية . النقطة الاولى : عندما ننتهي تماما ونحصل على نظرية رياضية تسمح بحساب النتائج ، ماذا يمكن أن نفعل ؟ انه حقا أمر لا يصدق . فلحساب ما تفعله الذرة في ظرف معين نضع توجيهات وملاحظات على الورق ثم

ندخلها في آلة ذات قاطعات تنفتح وتنغلق وفق نظام معقد ، وعلى النتيجة ان تقول لنا ما ستفعل الذرة ! فاذا كان نظام انغلاق القاطعات وانفتاحها ضربا من نموذج للذرة واذا فكرنا أن في الذرة قاطعات داخلية فانا أستطيع عندئذ أن أقول انني أفهم ، الى حد ما ، كيف تحدث الامور . وأرى مذهلا أن نستطيع التنبؤ عما يحدث بواسطة الرياضيات وهي ليست سوى قواعد ليس لها اية صلة بما يحدث في الذرة . فانفتاح القاطعات وانغلاقها في الآلة الحاسبة شيء يختلف تماما عما يحدث في الطبيعة .

وان أحد الجوانب المهمة في هذه الطريقة ، « اصدار فرضية ـ حساب النتائج ـ المقارنة مع التجربة » ، هو معرفة متى نكون على صواب . ويمكن أن نعرف ذلك حتى قبل التحقق من جميع النتائج . فالحقيقة يمكن أن تعرف من خلال جمالها ومن بساطتها . فمن السهل دوما ، عندما نجد فرضية ونقوم بحسابين صغيرين أو ثلاثة للتأكد من عدم خطئها ، أن نعرف اذا كانت صحيحة . فعندما نكون على صواب لا يخفي الصواب نفسه ـ على انسان له بعض الخبرة على الاقل ـ لان ما نجنيه يجب أن يفوق عموما ما نعطيه . وان فرضيتكم تعود في الواقع الى التأكيد على بساطة النظرية . فاذا لم تروا الخطأ راسا وكانت الفرضية ابسط من قبل فانها عندئذ صحيحة . فالناس الذين ليس لديهم خبرة والجهلاء من كل الاجناس يضعون فرضيات بسيطة ولكن الخبراء يرون بسهولة أنها خاطئة ولا يحسب لها حساب . وآخرون ، كالطلاب المبتدئين ، يضعون فرضيات معقدة جدا ذات ملامح تقريبية صحيحة لكن الخبير يعلم انها خاطئة لان الحقيقة تتجلى دوما بشكل ابسط مما تظنون . فنحن نحتاج الى خيال خصب ولكن الى خيال منضبط تماما .

ويجب علينا أن نوجد ، لهذا العالم ، صورة منسجمة مع كل ما هو معروف سلفا ولكنها ، مع ذلك ، على خلاف مع بعض تنبؤاته الاخرى ، والا فلا فائدة من هذه الصورة . وهذا الاختلاف يجب أن يتفق مع الطبيعة . فاذا توصلتم الى صورة أخرى للعالم تتفق مع مجمل المعلومات السابقة في مجالات اكتشافها وتختلف عنها في مجالات أخرى تكونون قد اكتشفتم شيئا عظيما . فمن المستحيل عمليا ، وليس تماما ، أن نجد نظرية تتفق مع التجارب في جميع المجالات التي تصح فيها النظريات

السابقة وتختلف ، رغم ذلك ، نتائجها في مجال آخر ، حتى ولو لم تكن نتائج هذه النظرية منسجمة مع الطبيعة . حقا ، ان من الصعوبة بمكان ان نخترع فكرة جديدة . لان هذا يتطلب خيالا عبقريا .

ما هو مستقبل هذه المغامرة ؟ ماذا سيحدث في النهاية ؟ سوف نستمر في البحث عن القوانين ، وكم قانونا سنجد ؟ لست أدري . فبعض زملائي يرون أن هذه السمة الاساسية للعلم ستستمر ، ولكنني أعتقد اننا لن نجد أشياء جديدة باستمرار ، ولنقل خلال الف عام قادمة . اي ليس بالامكان الاستمرار ابديا في اكتشاف قانون جديد كل يوم . ولو تقدّر أن يحدث ذلك لأصابنا الملل أمام هذه المستويات المتكدسة بعضا فوق بعض . والذي يمكن أن يحدث ، على ما أرى ، هو ان تصبح جميع القوانين معروفة ـ اي : عندما نملك العدد الكافي من القوانين التي نتمكن من حساب نتائجها والتي تنسجم في كل المجالات مع التجربة نكون قد بلغنا نهاية السلسلة ـ أو أن تصبح الاجراءات التجريبية أكثر فأكثر صعوبة أو اغلى فأغلى كلفة وبحيث نكون قد فسرنا ٩ر٩٩٪ من الظواهر الطبيعية ؛ ولكن سنقع باستمرار على ظواهر جديدة يصعب جدا قياسها ولا تتفق مع النظرية ؛ وبمجرد ان ننجح في تفسيرها تبرز ظاهرة احرى ، وهكذا تصبح الامور ابطأ فأبطأ والظواهر اتفه فأتفه . ذلك هو ما قد يحدث في النهاية . وانا اعتقد ان الامر سينتهي بهذا الشكل أو ذاك . ولكن لدينا الأن احتمال كبير في أن نعيش فترة اكتشافات عديدة . ولكنها كاكتشاف أمريكا ـ لا تكتشف سوى مرة واحدة . فنحن اليوم نعيش فترة اكتشاف القوانين الاساسية للطبيعة ، وهي فترة لن تعود . انها ممتعة ورائعة ولكنها لا يمكن ان تدوم . والمستقبل يخبىء لنا بالتأكيد مواضيع اخرى مثيرة : فهناك اهمية العلاقة بين شتى مستويات الظواهر الطبيعية ـ الظواهر البيولوجية وسواها او ، في مجال التحريات ، تحري الكواكب الاخرى ، لكن ما نكتشفه اليوم لن يتكرر اكتشافه .

وسيحدث شيء آخر ؛ ذلك انه اذا ثبت في النهاية أن كل شيء صار معلوما أو أن الملل قد اصابنا فان الفلسفة العتيدة أو العناية النبيهة التي

تحيط بكل هـذه الظواهر التي تحدثنا عنهـا تختفي شيئا فشيئا .
والفلاسفة الذين يبدون ، على المظاهر الخارجيـة للأمور ، ملاحظات سخيفة سيحاصروننا عن قرب وسوف يستحيل علينا أن نرد عليهم بقولنا : « لو كنتم مصيبين لاستطعنا اكتشاف جميع القوانين الباقية . » لأنهم ، عندمـا تصبح القوانين كلها معروفـة ، سيكون لديهم تفسير يقدمونه لكل قانون . فسيكون هناك ، في كل الاحوال ، أناس يفسرون لماذا كان العالم ذا أبعـاد ثلاثة . لكن لا يوجد سوى عالم واحد ومن الصعب أن نقرر اذا كان هذا التفسير صحيحا أم لا . سيوجد اذن من يشرح لماذا هذه القوانين صحيحة ، لكن هذا الشرح سيكون في اطار لن نتمكن من انتقاده على أساس أنه لا يشكل وسيلة تسمح لنا بالتقدم أكثر فأكثر . ان انحطاطا فكريا سيطرأ عندئذ كالفساد الذي يشكو منـه المستكشفون الكبار عندما يجتاح السواح المنطقة المكتشفة .

ان الناس في هذا العصر يعيشون تجربة اللذة ، اللذة الرائعة التي نشعر بها عندما نحزر كيف تتصرف الطبيعة في ظروف جديدة لم تتعرض اليها من قبل . فأنتم ، انطلاقا من تجارب ومعلومات حصلتم عليها في مجال ما ، سوف تستطيعون تخمين ما سيحدث في مجال لم يسبق أن تحراه انسان قط . وهذا يختلف قليلا عن التحريات التقليدية ، لأن لدينا ، على الارض التي اكتشفت ، من علامـات الاستدلال ما يكفي لتخمين ما قد نجد على الارض التي لم تكتشف بعد . هذه الاكتشافات غالبا ما تختلف كثيرا عما كنا قد شاهدناه ــ وتتطلب كثيرا من التفكير .

فما هو الشيء الذي في الطبيعة يتيح لنا ، انطلاقا من مجال ، أن نحزر كيف تجرى الامور في بقية المجالات ؟ ان هذا السؤال ليس من العلم في شيء ولا أدري كيف أجيب عليه . وعلى هذا سأعطيكم جوابا غير علمي: أعتقد أن السبب يكمن في البسـاطة واذن : في جمال الطبيعة الرائع .

الفهرس

إن الفصول السبعة التي يتألف منها هذا الكتاب هي سلسلة محاضرات ارتجلها العالم فاينمان بلهجة أليفة وأسلوب يتسم بالفكاهة. ولا يستطيع سوى أحد كبار الفيزيائيين في عصرنا الحاضر أن يشرح بمثل هذه الكفاءة وهذا الوضوح مواضيع الفيزياء التقليدية ومواضيع الفيزياء المعاصرة، هذه الفيزياء التي أسهم فاينمان نفسه في تقدمها وجلاء غوامضها إسهامًا خلاقًا. وهذه المحاضرات تستهدف جمهورًا واسعًا من القراء ليس لديه بالضرورة إلمام عميق بالرياضيات فترسم له صورة تحليلية واضحة وعصرية للقوانين الأساسية في الفيزياء وتروي له تاريخ هذا العلم منذ عصر غاليله حتى أيامنا هذه.